

RADIOAKTIIVISTEN AINEIDEN SIIRTYMINEN PÄÄSTÖPILVEN KULKEUTUMISEN AIKANA TUOTETTAVIIN ELINTARVIKKEISIIN

T. Valmari, A. Rantavaara, R. Hänninen

Tässä raporttisarjassa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-940-8 (nid.)

ISBN 951-712-941-6 (pdf)

ISSN 0781-1705

Dark Oy, Vantaa, 2004

Myynti:

STUK – Säteilyturvakeskus

PL 14, 00881 Helsinki

Puh. (09) 759881

Faxi (09) 75988500

Alkusanat

Tämä tutkimus käsittelee elintarviketeollisuuden tuotteiden saastumista poikkeuksellisessa säteilytilanteessa suoraan ilmassa olevista radioaktiivista aineista. Työ kuuluu osana Säteilyturvakeskuksessa tehtävään eri säteilyaltistusreittien arviointiin ja vastatoimenpiteiden suunnitteluun säteilytilanteiden varalta.

Työn rahoittivat Säteilyturvakeskuksen ohella Huoltovarmuuskeskus ja Elintarvikepooli. Esa Latvio Elintarvikepoolista järjesti kontaktit teollisuuteen. Projektin johtoryhmässä olleet Latvio sekä Hannes Kulmala Huoltovarmuuskeskuksesta toivat esille työn kohdentamisen kannalta tärkeät alueet, ja neuvoillaan tukivat työn edistymistä. Lämpimät kiitokset heille.

Haluamme kiittää Jari Sankaria, Lauri Laukkasta, Risto Mattilaa ja Lasse Koskimiestä Raisio Yhtymästä, Arto Ahtiaista Suomen Rehu Oy:stä sekä Matti Mattilaa ja Hannu Rämää Vaasan & Vaasan Oy:stä, jotka perehdyttivät meitä prosesseihin joissa ilmaa käytetään ja tukivat työtä.

VALMARI Tuomas, RANTAVAARA Aino, HÄNNINEN Riitta. Radioaktiivisten aineiden siirtyminen päästöpilven kulkeutumisen aikana tuotettaviin elintarvikkeisiin. STUK-A200 Helsinki 2004, 50 + 1 s.

Avainsanat: säteilyvaaratilanne, elintarvikkeet, koagulaatio

Tiivistelmä

Raportissa tarkastellaan ydinvoimalaitosonnettomuuden, ydinaseräjähdyksen tms. säteilyvaaratilanteen aikana ilmassa olevien radioaktiivisten aineiden siirtymistä elintarvikkeisiin teollisuuden käyttämän ilman välityksellä. Ilmaa käytetään muun muassa hiukkasmaisten tuotteiden pneumaattiseen kuljettamiseen. Tätä reittiä tapahtuvan saastumisen välttäminen edellyttää päätöstä tuotannon keskeyttämisestä tai muista suojaustoimenpiteistä jo ennen kuin radioaktiiviset aineet kulkeutuvat tuulen mukana paikkakunnalle, jolloin tilanteesta ei ehkä vielä ole selkeää kokonaiskuvaa. Tältä osin suoraan ilmasta tapahtuva elintarvikkeiden saastuminen poikkeaa laskeuman alle jääneen raaka-aineen aiheuttamasta saastumisriskistä.

Kuljetettaessa jauhoja tai muita hiukkasmaisia tuotteita saastuneessa ilmassa kiinnittyvät radioaktiiviset hiukkaset tuotehiukkasiin lähinnä turbulentin ja termisen koagulaation avulla. Turbulentin koagulaation seurauksena tuotehiukkasten aktiivisuuspitoisuus kasvaa noin 0,003 Bq/kg sekunnissa, jos ilmassa olevien aktiivisten hiukkasten kokonaisaktiivisuus on 1 Bq/m³. Pienten tuotehiukkasten (< 30 µm) aktiivisuuspitoisuus kasvaa termisen koagulaation vuoksi tätä nopeammin. Jos poistoilman suodattimeen jäänyt tuote kerätään talteen, voidaan arvioida kaikkien ilmassa olleiden radioaktiivisten aineiden jäävän tuotteeseen viimeistään tässä vaiheessa.

Neljän vähittäiskaupasta hankitun jauhun hiukkaskokojakaumamittausten mukaan aktiiviset aineet kiinnittyisivät lähes yksinomaan alle 10 µm kokoisiin jauhohiukkasiin. Aktiivisten, 1 µm kokoisten hiukkasten kiinnittymisnopeus kyseisiin jauhoihin olisi noin kymmenkertainen edellä mainittuun pelkästä turbulentista koagulaatiosta johtuvaan kiinnittymisnopeuteen verrattuna.

Ydinvoimalaitosonnettomuudesta vapautuvista aineista cesiumin isotoopit ¹³⁴Cs ja ¹³⁷Cs ovat pitkään varastoitavien elintarvikkeiden kannalta keskeisiä. Cesiumia helpommin vapautuvan jodin isotoopit, kuten ¹³¹I, ehtivät hajota varastoinnin aikana. Ydinaseräjähdyksestä saastuneiden tuotteiden kokonaisaktiivisuuden voidaan arvioida ajan kuluessa pienenevän

verrannollisena tekijään $t^{-1,2}$. Aktiivisuuden pieneneminen on aluksi nopeaa, joten ydinaseräjähdyksen seurauksena saastuneet tuotteet saattavat olla varastoinnin jälkeen vain lievästi saastuneita, vaikka tuotteiden valmistamisen aikana vallinnut ulkoinen säteily olisi ollut ihmisten suojautumistoimenpiteitä edellyttävällä tasolla.

VALMARI Tuomas, RANTAVAARA Aino, HÄNNINEN Riitta. *Transfer of radionuclides from outdoor air to foodstuffs under industrial processing during passage of radioactive plume. STUK-A209. Helsinki 2004, 50 pp + Appendix 1 p. In Finnish.*

Keywords: radiation danger situation, food products, coagulation

Summary

Transport of airborne radioactive substances directly from air to food products that are being processed at the time of a nuclear power plant accident, a nuclear weapon explosion, or other radiation danger situation is studied. Air is used in food industry, e.g., for pneumatic transport of products. The production is to be interrupted before the radioactive substances reach the locality via winds and when there is not necessarily yet a clear general view of the radiation danger situation. From this point of view, the contamination directly from the air differs clearly from that due to use of contaminated raw material.

Radioactive aerosol particles are attached to the product particles in the air mainly due to turbulent and thermal coagulation. The activity concentration of the product particles increases by approximately 0,003 Bq/kg per second due to turbulent coagulation when the activity concentration in the air is 1 Bq/m³. The activity concentration of small product particles (< 30 µm) increases faster due to thermal coagulation. If the product particles retained on exhaust air filter are recovered, all the radioactive particles in the air can be assumed to attach on the product at the latest at this point.

Particle size distribution was measured of four flours obtained from a grocery. The results show that radioactive aerosol particles would attach predominantly on those flour particles with a diameter smaller than 10 µm. Radioactive particles with a diameter of 1 µm would attach to the studied flours with a rate of approximately tenfold compared to the rate by turbulent coagulation only, as referred to above.

Cesium isotopes ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs are the most significant radionuclides released in nuclear power plant accidents considering products with a long storage time. Iodine isotopes, such as ¹³¹I, are released easier than cesium but they decay already during storage. The total activity concentration of products contaminated from a nuclear weapon explosion can be estimated to lower with time proportional to $t^{-1,2}$. The activity concentration decreases rapidly at first, so that the products contaminated due to a nuclear weapon explosion may be only slightly contaminated after the storage time, even if the external radiation during the fabrication of the products had required protection of people at the time.

Sisällysluettelo

Alkusanat	3
Tiivistelmä	4
Summary	6
1 Johdanto	8
2 Radioaktiivisten aineiden vapautuminen ja kulkeutuminen	11
2.1 Ydinvoimalaitosonnettomuudet	11
2.2 Ydinaseet	14
2.3 Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ilmassa	15
2.4 Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraalin arvioiminen jälkeenpäin laskeumamittauksista	17
3 Koagulaatio	21
3.1 Koagulaatiomekanismeja	21
3.2 Koagulaation aiheuttama aktiivisuuspitoisuus tuote- hiukkasissa	23
4 Radioaktiivisten hiukkasten tarttuminen tuotehiukkasiin	27
4.1 Teollisuuslaitoksen käyttämän ilman aktiivisuus	27
4.2 Radioaktiivisten hiukkasten tarttuminen tuotehiukkasiin ilmassa koaguloitumalla	28
4.3 Kiinnittyminen poistoilman suodattimessa	32
4.4 Varastoitavan raaka-aineen ja tuotteen saastuminen	33
5 Jauhojen hiukkaskoko	34
6 Toiminnasta valmiustilanteen aikana	38
6.1 Ulkoisen säteilyn annosnopeus	38
6.2 Myllyn mahdolliset toimenpiteet tuotteiden suojaamiseksi	43
7 Johtopäätökset	46
8 Kirjallisuusviitteet	48
Usein käytetyt lyhenteet	50
Liite 1	51

1 Johdanto

Ydinvoimalaitosonnettomuudessa tai ydinaseräjähdyksessä ilmaan vapautuvat aineet kulkeutuvat tuulen mukana kaasuna ja mikrometrikokoluokan hiukkasina. Ne päätyvät ihmiseen pääasiassa joko hengityksen kautta tai siten että laskeutuvat pelloille, niityille, metsiin ja vesistöihin josta päätyvät maidon ja muiden elintarvikkeiden kautta ihmiseen. Tämän lisäksi päästöpilvestä maahan laskeutuneet radioaktiiviset aineet aiheuttavat ulkoista säteilyä laskeuma-alueella oleskeleville ihmisille. Näitä altistusreittejä on tarkasteltu mm. lähteessä UNSCEAR (2000) sekä suomen kielellä vuonna 2003 ilmestyvässä kirjassa Pöllänen (ed.) (2003).

Tässä raportissa tarkastellaan sellaista vaihtoehtoista altistusreittiä, jossa saastunutta ilmaa kulkeutuu elintarvikkeita tuottavaan teollisuuslaitokseen. Jos hiukkasmuodossa olevien tuotteiden pneumaattiseen kuljettamiseen käytettävä ilma on saastunutta, tarttuvat ilmassa olevat tuotehiukkaset ja radioaktiivisia aineita sisältävät hiukkaset toisiinsa. Lisäksi varastoitavana olevat suojaamattomat tuotteet voivat saastua kun ilmassa olevat hiukkaset laskeutuvat niiden pinnalle. Ilman kautta tapahtuvan saastumisen erityispiirteenä on se, että saastumisriski on olemassa jo ennen kuin ulkoilmaan vapautuneet radioaktiivisia aineita sisältävät hiukkaset ovat laskeutuneet maahan. Mahdolliset toimenpiteet, kuten tuotannon keskeyttäminen, on siis tehtävä jo siinä vaiheessa, kun tilanteesta ei vielä ole selkeää kokonaiskuvaa. Toisaalta ilman käyttö ei juurikaan aiheuta vaaraa sen jälkeen kun radioaktiiviset aineet ovat laskeutuneet maahan. Monen muun saastumisreitin, esimerkiksi saastuneen raaka-aineen käytön, kannalta nimen omaan laskeuma on tärkeä. Ilmaa käyttävän elintarviketeollisuuden tuotteiden valmistuksen ja kulutuksen välinen aika on usein viikkojen tai kuukausien mittainen, jolloin ainoastaan pitkäikäiset radionuklidit, kuten ^{134}Cs ja ^{137}Cs , ovat merkittäviä.

Ydinvoimalaitoksia, jotka ovat riittävän lähellä jotta niissä tapahtuva onnettomuus voisi aiheuttaa vakavan säteilytilanteen Suomessa, on viidellä paikakunnalla: Olkiluodossa, Loviisassa, Forsmarkissa (220 km Turusta), Sosnovyi Borissa (130 km Kotkasta) ja Kuolassa. Raportissa käsitellään myös ydinaseräjähdyksen vaikutusta. Radioaktiivisia aineita voi vapautua ilmaan myös ydinmateriaalivarastoista tai ydinmateriaalin kuljetusten yhteydessä. Näissä mahdollisesti vapautuvien radioaktiivisten aineiden määrä on kuitenkin pieni verrattuna voimalaitosonnettomuuksiin tai ydinräjähteisiin, ja aineet leviävät suhteellisen pienelle alueelle.

Säteilysuojelun toimenpiteitä säteilyvaaratilanteessa on käsitelty ohjeessa VAL 1.1 (2001). Jos onnettomuus on ollut vakava ja vaikutusalueeltaan laaja, joudutaan elintarvikkeiden käytölle asetettavia rajoituksia punnitsemaan muun ohessa elintarvikehuollon turvaamisen, puhtaiden elintarvikkeiden saantimahdollisuuksien ja myös elintarviketuotantoon liittyvien sosiaalisten ja taloudellisten tekijöiden näkökulmasta. Euroopan unionin säännöstössä tähän on varauduttu siten, että unionin neuvosto voi komission esityksestä tehdä erillispäätöksen tilannekohtaisten enimmäisarvojen käyttöönotosta onnettomuuden jälkeen. Niin kauan kuin erillispäätöstä ei ole tehty, komissio voi onnettomuustilanteessa määrätä käyttöön otettavaksi ennakkoon vahvistetut elintarvikkeiden aktiivisuuspitoisuuksien raja-arvot. Taulukossa I esitetyt toimenpidetasot vastaavat näitä raja-arvoja, joita sovelletaan unionin sisäiseen kauppaan (Neuvoston asetus 3954/87). Jäsenvaltiot ovat velvolliset toimimaan niiden mukaan.

Toimenpidetasot ovat eri suuria eri nuklideille johtuen niiden eri suuruisista terveyshaitoista ihmiselle. Erityisesti plutoniumille, sekä plutoniumia raskaammille alkuaineille eli transplutoniumeille, toimenpidetasot ovat huomattavasti tiukempia kuin muille aineille.

Tässä raportissa arvioidaan, kuinka suuria aktiivisuuspitoisuuksia voi kertyä saastuneessa ilmassa kuljetettavaan tuotteisiin ja mitkä ovat oleellimmat asiaan vaikuttavat tekijät. Lisäksi käydään läpi mahdollisia toimenpiteitä poikkeuksellisen säteilytilanteen aikana. Raportti käsittelee erityisesti jauhomylyjä, mutta osa raportissa käsiteltävistä asioista on yleistettävissä muuhunkin ilmaa käyttävään elintarviketeollisuuteen.

Taulukko I. Yleiset toimenpidetasot aktiivisuuspitoisuuksille eri elintarvikkeissa. Toimenpidetasot ovat enimmäispitoisuuksia, jotka on Euroopan unionissa säädetty ennakoon onnettomuuden varalta ¹⁾.

Radionuklidit	Aktiivisuuspitoisuus, Bq/kg		
	Vauvan ruoat	Maitotuotteet ja nestemäiset elintarvikkeet	Muut elintarvikkeet
Strontium-isotoopit	75	125	750
Jodin isotoopit	150	500	2000
Plutonium- ja transplutonium- isotoopit	1	20	80
Muut radionuklidit, joiden puoliintumisaika on yli 10 vrk, esim. ¹³⁴ Cs ja ¹³⁷ Cs ²⁾	400	1000	1250

¹⁾ Euroopan unionin sisällä käytävässä elintarvikkeiden kaupassa taulukon mukaiset enimmäisaktiivisuuspitoisuudet voidaan onnettomuuden tapahduttua ottaa tarvittaessa käyttöön komission päätöksellä. Erityiset tilannekohtaiset raja-arvot voidaan ottaa käyttöön neuvoston päätöksellä.

²⁾ Ei koske ³H ja ¹⁴C-nuklideja.

Luvussa 2 käydään kirjallisuuteen pohjautuen lyhyesti läpi sitä, missä muodossa ja kuinka suurina pitoisuuksina pitkäikäisiä radioaktiivisia aineita voi ilmassa olla ydinvoimalaitosonnettomuuden tai ydinaseräjähdyksen jälkeen. Luvussa 3 johdetaan yhtälöt joita tarvitaan saastuneessa ilmassa olleiden tuotteiden aktiivisuuspitoisuuden arvioimiseksi. Luvussa 4 tarkastellaan saastumista teollisuuslaitoksessa käyttäen luvussa 3 johdettuja yhtälöitä. Nopeus, jolla aktiiviset hiukkaset kiinnittyvät ilmassa oleviin tuotehiukkasiin riippuu oleellisesti hiukkasten koosta. Jauhomyllyjen osalta asiaa selvitettiin määrittämällä neljän eri jauhон hiukkaskokojakaumat (luku 5). Valmiustilanteen aikaista toimintaa käsitellään luvussa 6, ja johtopäätökset esitetään luvussa 7.

2 Radioaktiivisten aineiden vapautuminen ja kulkeutuminen

Ulkoilmaan vapauduttuaan radioaktiiviset aineet ovat – kaasumaisia aineita lukuunottamatta – pieninä ilmassa leijuvina hiukkasina eli aerosolihiukkasina. Mitä suurempi on hiukkanen, sitä suurempi on siihen kohdistuva maan vetovoima suhteessa putoamista hidastavaan ilmanvastukseen. Suurikokoiset hiukkaset laskeutuvat maahan (deponoituvat) lähelle vapautumiskohtaa. Esimerkiksi halkaisijaltaan 10 µm hiukkanen laskeutuu ilmassa alaspäin nopeudella 0,003 m/s ja 100 µm kokoinen hiukkanen nopeudella 0,25 m/s (lukuarvot pätevät pyöreille hiukkasille, joiden tiheys on sama kuin veden eli 1 g/cm³). Kilometrin korkeudelta vapautuessaan ne ehtivät olla ilmassa 4 vuorokautta (10 µm hiukkanen) tai 1 tunnin (100 µm hiukkanen) ennen deponoitumistaan. Jos tuulen nopeus on 5 m/s, ne ehtivät tänä aikana kulkeutua 1700 km (10 µm hiukkanen) tai 20 km (100 µm hiukkanen) etäisyydelle.

Pienten, halkaisijaltaan alle 1 µm, hiukkasten kulkeutumiseen ei maan vetovoima mainittavasti vaikuta. Ne kulkeutuvat kaasumaisten aineiden tavoin tuulen mukana kauas päästöalueelta. Lopulta nekin deponoituvat maahan joko sateen mukana tai ilman pystysuuntaisten liikkeiden takia.

Aerosolihiukkasten muodostumisen kannalta on oleellista, onko lämpötila ollut niin korkea, että aine on höyrystynyt. Sekä ydinaseräjähdyksissä että vakavimmiksi arvioitujen skenaarioiden mukaisissa ydinvoimalaitos-onnettomuuksissa radioaktiiviset aineet kuumenevat voimakkaasti. Kuumenemisen seurauksena aineet höyrystyvät ja jäähtyessään muodostavat alle 1 µm pienhiukkasia. Osa höyryistä voi tiivistyä tai kemiallisen reaktion kautta päätyä ilmassa ennestään olevien suurten hiukkasten pintaan, mutta höyryn kautta aerosolihiukkasiin päätyneet aineet ovat yleensä rikastuneet pienhiukkasiin. Toisaalta mekaanisesti – eli muuten kuin höyrystymisen kautta – ilmaan vapautuneet hiukkaset ovat aina kooltaan suuria (> 1 µm). Hiukkasia vapautuu mekaanisesti esimerkiksi räjähdysten seurauksena.

Radioaktiivisia aineita on ilmassa myös kaasuna. Tärkeimmistä radioaktiivisista aineista kaasumaisia ovat jodi – silloin kun se esiintyy esimerkiksi alkuainemuodossa (I₂) tai metyylijodidina CH₃I – sekä jalokaasut.

2.1 Ydinvoimalaitosonnettomuudet

Uhkaava tilanne ydinvoimalaitoksessa havaitaan jo useita tunteja ennen varsinaista radioaktiivisten aineiden päästöä ulkoilmaan. Ydinpolttoaineen lämpötilan kohotessa kaasumaiset aineet vapautuvat polttoaineesta helpommin kuin

tiivistyneet (nestemäiset tai kiinteät) aineet. Onnettomuusskenaarioiden mukaan ympäristöön vapautuukin helpoimmin kaasumaisia tai reaktorin sydämen ylikuumentuessa höyrystyviä aineita.

Aineen esiintyminen joko höyrynä tai tiivistyneenä riippuu siitä, minä kemiallisena yhdisteenä se esiintyy. Ydinreaktorissa olevat radioaktiiviset aineet voidaan jaotella höyrystymisen perusteella seuraavasti:

- **Jalokaasut (xenon ja krypton):** Esiintyvät inertteinä (eli eivät reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa) kaasuna. Ne vapautuvat ympäristöön helpommin kuin muut aineet, koska ovat kaikissa olosuhteissa kaasumaisia. Jalokaasut eivät kuitenkaan tässä yhteydessä ole tärkeitä, koska ne eivät kiinnity elintarviketeollisuuden tuotteisiin. Jalokaasut eivät myöskään muodosta laskeumaa.
- **Jodi:** Esiintyy sekä kaasuna että hiukkasissa. Kaasumaisia ovat alkuainemuodossa oleva jodi (I_2), vetyjodidi (HI) sekä orgaanisissa yhdisteissä esiintyvä jodi (lähinnä metyylijodidi CH_3I). Cesiumjodidin (CsI) kiehumispiste on 1280 °C , joten se voi höyrystyä ylikuumenneessa ydinpolttoaineessa, mutta on ulkoilmassa tiivistyneenä.
- **Cesium:** Suurin osa cesiumista (esimerkiksi CsI ja CsOH) höyrystyy ylikuumenneessa polttoaineessa. Ulkoilman lämpötilassa kaikki cesium-yhdisteet ovat tiivistyneitä.
- **Muut alkuaineet:** Höyrystyvät korkeammassa lämpötilassa kuin CsI ja CsOH (poikkeuksena ruteeni, joka saattaa höyrystyä ydinpolttoaineesta oksidina, jos olosuhteet ovat hapettavat). Ovat ulkoilman lämpötilassa tiivistyneinä.

Käyttämätön ydinpolttoaine sisältää uraanin isotooppien lisäksi lyhytikäisiä hajoamistuotteita. Muut radionuklidit syntyvät ydinreaktorissa. Reaktorin nuklidisisältö riippuu siitä, kuinka pitkään polttoaine on ollut reaktorissa sekä reaktorin tyypistä. Taulukossa II on lueteltu ilmaa käyttävän teollisuuden kannalta ydinvoimalaitosonnettomuustilanteessa tärkeitä radionuklideja. Jalokaasut sekä nuklidit, joilla on lyhyt puoliintumisaika, on jätetty pois. Kustakin nuklidista on esitetty sen aktiivisuus 6 tuntia ja 30 vuorokautta ketjureaktion pysähtymisen jälkeen sekä puoliintumisaika. Joissakin tapauksissa nuklidia esiintyy kauemmin kuin puoliintumisaika antaisi aiheuttaa olettaa, koska sitä syntyy koko ajan lisää muiden nuklidien radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Nuklidit on ryhmitelty siten, että ensimmäisenä on helpoimmin höyrystyvä ryhmä (jodi), josta siis oletettavasti vapautuu ilmaan suurempi osuus kuin muista ryhmistä. Plutonium- ja transplutonium-isotoopit ovat hyvin vaikeasti höyrystyviä. Ne on ryhmitelty erikseen, koska toimenpidetasot ovat niille selvästi tiukempia kuin muille nuklideille.

Taulukko II. Ilmaa käyttävän teollisuuden suojaamisen kannalta tärkeitä radionuklideja. Jalokaasut ja nopeasti hajoavat nuklidit on jätetty pois. Aktiivisuus riippuu reaktorin tehosta, tyypistä, ja siitä kuinka kauan polttoaine on ehtinyt olla reaktorissa. Esitetyt aktiivisuudet ovat esimerkkitapaus lämpöteholtaan n. 2 GW kiehutusvesireaktorille, jos ketjureaktio pysähtyy siinä vaiheessa kun polttoaineesta on tuotettu energiaa 20000 MWd/tUO₂.

Aktiivisuus (Bq), kun ketjureaktion pysähtymisestä on kulunut			
	6 tuntia	30 vrk	Puoliintumisaika
Jodi			
¹³¹ I	2,1 · 10 ¹⁸	1,6 · 10 ¹⁷	8,0 d
¹³² I	3,0 · 10 ¹⁸	5,3 · 10 ¹⁵	2,3 h
Cesium ja rubidium			
¹³⁷ Cs	2,3 · 10 ¹⁷	2,3 · 10 ¹⁷	30,2 a
¹³⁴ Cs	2,1 · 10 ¹⁷	2,1 · 10 ¹⁷	2,1 a
¹³⁶ Cs	9,1 · 10 ¹⁶	1,9 · 10 ¹⁶	13,2 d
⁸⁶ Rb	2,6 · 10 ¹⁵	8,6 · 10 ¹⁴	18,6 d
Telluuri ja antimoni			
¹²⁹ M ^{Te}	9,6 · 10 ¹⁶	5,2 · 10 ¹⁶	33,6 d
¹²⁵ Sb	3,0 · 10 ¹⁶	3,0 · 10 ¹⁶	2,8 a
¹²⁷ M ^{Te}	2,7 · 10 ¹⁶	2,3 · 10 ¹⁶	109 d
¹²⁵ M ^{Te}	5,7 · 10 ¹⁵	5,8 · 10 ¹⁵	57,4 d
Strontium ja barium			
⁸⁹ Sr	2,3 · 10 ¹⁸	1,5 · 10 ¹⁸	50,5 d
⁹⁰ Sr	1,8 · 10 ¹⁷	1,8 · 10 ¹⁷	28,8 a
¹⁴⁰ Ba	3,8 · 10 ¹⁸	7,6 · 10 ¹⁷	12,8 d
Ruteeni			
¹⁰³ Ru	3,1 · 10 ¹⁸	1,8 · 10 ¹⁸	39,3 d
¹⁰⁶ Ru	9,0 · 10 ¹⁷	8,5 · 10 ¹⁷	374 d
Hyvin vaikeasti höyrystyviä			
⁹⁵ Nb	3,8 · 10 ¹⁸	3,6 · 10 ¹⁸	35,0 d
⁹⁵ Zr	3,8 · 10 ¹⁸	2,8 · 10 ¹⁸	64,0 d
¹⁴⁴ Ce	2,8 · 10 ¹⁸	2,6 · 10 ¹⁸	285 d
⁹¹ Y	2,9 · 10 ¹⁸	2,0 · 10 ¹⁸	58,5 d
¹⁴¹ Ce	3,7 · 10 ¹⁸	1,9 · 10 ¹⁸	32,5 d
Pu ja trans-Pu (myös hyvin vaikeasti höyrystyviä)			
²⁴¹ Pu	2,7 · 10 ¹⁷	2,7 · 10 ¹⁷	14,4 a
²³⁸ Pu	2,4 · 10 ¹⁵	2,5 · 10 ¹⁵	87,7 a
²⁴⁰ Pu	1,0 · 10 ¹⁵	1,0 · 10 ¹⁵	6563 a
²³⁹ Pu	9,5 · 10 ¹⁴	9,6 · 10 ¹⁴	24110 a
²⁴⁴ Cm	6,6 · 10 ¹⁴	6,6 · 10 ¹⁴	18,1 a
²⁴¹ Am	2,9 · 10 ¹⁴	3,2 · 10 ¹⁴	432 a

Ilmaa käyttävän teollisuuden suojaamisen kannalta tärkeimmät radionuklidit ovat cesiumin pitkäikäiset isotoopit ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,2$ vuotta) ja ^{134}Cs ($T_{1/2} = 2,1$ vuotta). Myös jodi on tärkeä, mutta lyhyen puoliintumisajan (8,0 vrk) takia vain sellaisten tuotteiden osalta, joita ei varastoida pitkään. Myös Ru, Sr (jonka toimenpidetaso on hiukan useimpia nuklideja tiukempi) ja Pu (toimenpidetaso selvästi muita tiukempi) ovat huomion arvoisia.

2.2 Ydinaseet

Ydinaseen räjähtäessä ilmakehässä muodostuu tulipallo, jonka halkaisija riippuu räjähteen koosta. Tulipallo nousee voimakkaasti ylöspäin, koska se on huomattavasti ympäröivää ilmaa kuumempi. Esimerkiksi 1000 kilotonnin pommin (vastaa räjähdysvoimaltaan tuhatta kilotonnia (kt) trotyyliä) räjähdyksessä muodostuva tulipallo saavuttaa 10 sekunnin kuluttua noin 2 km läpimitan, ja nousee minuutissa kahdeksan kilometrin korkeuteen samalla jäähtyen (Glasstone ja Dolan, 1977). Kuumaan tulipalloon imeytyy kylmää ilmaa alhaalta päin. Jos räjähdys tapahtuu matalalla, erityisesti jos tulipallo koskettaa maanpintaa, imeytyy maasta ylöspäin nousevan ilman mukana kymmenien tai satojen mikrometrien hiukkasia tulipalloon. Maasta radioaktiiviseen pilveen nouseva pöly muodostaa ydinaseräjähdykselle tunnusomaisen sienen muotoisen pilven kantaosan. Ydinaseräjähdyksessä lämpötila nousee niin korkeaksi, että kaikki räjähteen osat höyrystyvät. Tulipallon jäähtyessä radioaktiiviset aineet joko tiivistyvät maasta nousseiden suurten hiukkasten pintaan, tai jos näitä ei ole riittävästi ne muodostavat pieniä hiukkasia. Tiivistyneistä höyryistä muodostuu sienen muotoisen pilven lakkiosa.

Suuret hiukkaset nousevat aluksi radioaktiivisen pilven mukana, mutta nousuvauhdin hiipuessa ne alkavat pudota kohti maata. Suuret hiukkaset muodostavat lähilaskeuman, joka saattaa ulottua enimmillään muutamien satojen kilometrien päähän räjähdyspaikalta. Lähilaskeuma tapahtuu ensimmäisen vuorokauden kuluessa räjähdyksestä. Ulkona suojaamattomina varastoitavat raaka-aineet tai tuotteet voivat pahasti saastua lähilaskeumasta.

Pienet hiukkaset muodostavat kaukolaskeuman. Pienhiukkasille maan vetovoiman merkitys suhteessa ylöspäin nousevan ilman aiheuttamaan nostovoimaan on vähäinen, joten ne nousevat tulipallon mukana kilometrien korkeuteen. Nousukorkeus riippuu sääolosuhteista ja voi olla jopa yli 30 km. Kilotonniluokan räjähteessä pienhiukkaset yleensä jäävät troposfääriin, jossa viipyvät muutamia viikkoja ennen laskeutumistaan maahan esimerkiksi sateen mukana. Jos räjähdde on megatonniluokkaa, pystyvät hiukkaset nousemaan stratosfääriin asti. Sadepilvet sijaitsevat stratosfäärin alapuolella troposfäärissä, joten stratosfääriin asti nousseet hiukkaset saattavat laskeutua maahan vasta jopa vuosien kuluttua räjähdyksestä.

Fissioräjähdyksessä muodostuvien fissiotuotteiden kokonaisaktiivisuus minuutin kuluttua räjähdyksestä on luokkaa 10^{21} Bq kilotonnia kohti. Se pienee jo vuorokauden aikana alle tuhannesosaan (Glasstone ja Dolan, 1977). Hiroshimaan ja Nagasakiin 1945 pudotetut fissioräjähteet olivat voimakkuudeltaan 12,5 kt ja 22 kt, mutta tämän jälkeen on kehitetty huomattavasti tehokkaampia ydinaseita. Yhden kilotonnin fissioräjähteessä vapautuva energia vastaa noin 50...60 gramman ydinainemäärän täydellistä fissioitumista.

Kuvassa 1 on esitetty fissiotuotteiden kokonaisaktiivisuuden pieneneminen puolen vuoden aikana räjähdysten jälkeen. Kokonaisaktiivisuuden A on oletettu noudattavan aikariippuvuutta

$$A(t) = A(t_0) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-41,2}, \quad (1)$$

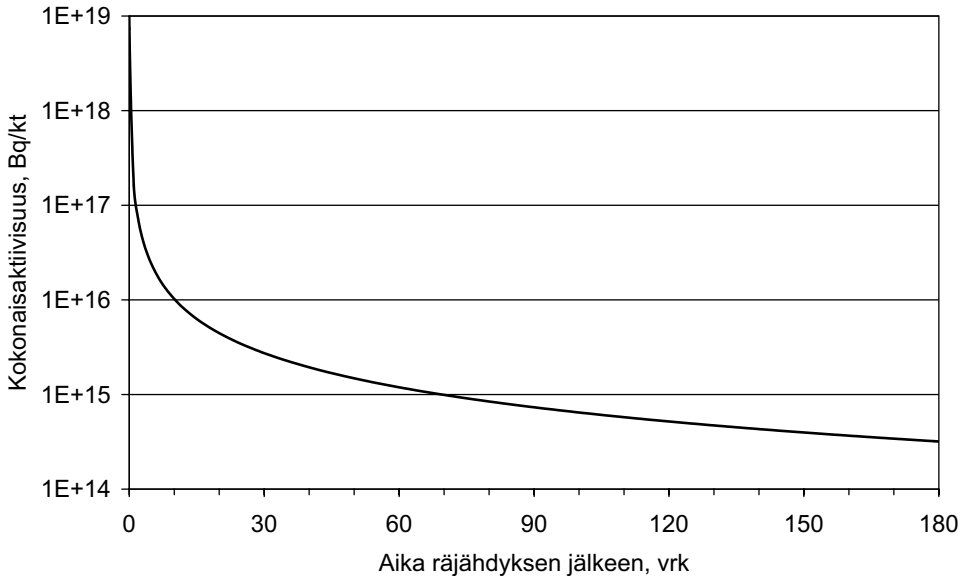
missä t on aika räjähdysketkestä ja t_0 referenssiajankohta, yleensä 1 tunti räjähdysketken jälkeen (Glasstone ja Dolan, 1977). Yhtälö (1) pätee kohtalaisen hyvin aikavälillä 30 min – 6 kk räjähdysten jälkeen. Räjähdysten seurauksena muodostuu fissiotuotteiden lisäksi myös aktivoitumistuotteita, kun räjähdyksessä vapautuvat neutronit aktivoivat muun muassa maaperää. Jos aktivoitumistuotteita muodostuu runsaasti, heikentää se yhtälön (1) antaman ennusteen tarkkuutta.

Kymmenen vuorokautta räjähdysten jälkeen aktiivisimpia radionuklideja ovat oletettavasti ^{140}La , ^{140}Ba ja ^{131}I (aktiivisin ensin mainittuna) ja sata vuorokautta räjähdysten jälkeen ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{89}Sr ja ^{106}Ru . Muutaman vuoden kuluttua aktiivisimpia ovat ^{137}Cs ja ^{90}Sr (Hallden ym., 1961).

Fuusioräjähdyksessäkin suurin osa vapautuvista radioaktiivisista aineista on peräisin fuusioreaktion laukaisevista fissioreaktioista. Fuusioräjähdyksessä vapautuu lisäksi tritiumia, eli vedyn radioaktiivista isotooppia ^3H arviolta 10^{14} Bq/kt. Tritiumin puoliintumisaika on 12,3 vuotta.

2.3 Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ilmassa

Ulkoilmaan vapautuneet radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset ja radioaktiiviset kaasut kulkeutuvat tuulen mukana ympäristöön, ja osa niistä voi päätyä teollisuuslaitoksen käyttämään ilmaan. Teollisuuslaitoksen kannalta oleellisia suureita ovat kunkin radionuklidin aktiivisuuspitoisuus ilmassa sekä aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali laitoksen käyttämässä ilmassa.



Kuva 1. Fissiotuotteiden kokonaisaktiivisuus yhden kilotonnin ydinaseräjähdyksen jälkeen (Glasstone ja Dolan, 1977).

Aktiivisuuspitoisuus c_A on kuutiometrissä ilmaa tapahtuvien hajoamisten määrä aikayksikössä (yksikkö Bq/m³). Aktiivisuuspitoisuuden arvo vaihtelee ajan myötä. Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali C_A (yksikkö (Bq/m³)·s) puolestaan kuvaa paikkakunnan ohi kulkeutuvan päästöpilven aiheuttamaa kokonaisaltistusta. Se on keskimääräinen aktiivisuuspitoisuus ulkoilmassa säteilytilanteen aikana ($c_{A,ka}$) kerrottuna tilanteen kestoajalla, eli

$$C_A = \int_{t_0}^{t_l} c_A dt = c_{A,ka} t \quad (2)$$

missä t_0 on hetki, jolloin radioaktiivisia aineita sisältävä pilvi saapuu paikalle, t_l on hetki, jolloin ilma on puhdistunut ja t on tilanteen kesto aika ($t = t_l - t_0$).

Taulukossa III tarkastellaan päästön aiheuttamaa c_A :n ja C_A :n arvoa maan pinnan tasolla eri etäisyyksillä onnettomuuspaikasta eräissä säätilanteissa. Laskuissa on käytetty STUKissa kehitettyä AINO-ohjelmaa. Tarkastelu koskee pitkäikäisiä nuklideja, kuten esim. ¹³⁴Cs ja ¹³⁷Cs, joiden aktiivisuuspitoisuus ei ehdi merkittävästi pienentyä kulkeutumisen aikana. Esimerkkinä käytetään 10¹⁷ Bq suuruista päästöä. Tämä vastaa suuruusluokaltaan sellaista päästöä, jossa kaikki tyypillisen kokoisessa (1000 MW) reaktorissa oleva ¹³⁷Cs vapautuisi ilmaan. Vakavimmassa tapahtuneessa

ydinvoimalaitosonnettomuudessa – Tshernobylin onnettomuudessa vuonna 1986 – reaktorin sisältämästä cesiumista arvioidaan vapautuneen 20–40% eli $0,6\text{--}1,1 \cdot 10^{17}$ Bq ^{137}Cs :ää sekä $0,4\text{--}0,7 \cdot 10^{17}$ Bq ^{134}Cs :ää (OECD/NEA 1995). Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali Nurmijärvellä (1000 km etäisyydellä Tshernobylistä) oli ^{131}I :n osalta $2 \cdot 10^7$ (Bq/m³)·s ja ^{137}Cs :n osalta $5 \cdot 10^5$ (Bq/m³)·s (Sinkko ym., 1987). Suurin aktiivisuuspitoisuus Nurmijärvellä mitattiin 28.4.1986. Tällöin ^{131}I -pitoisuus oli 223 Bq/m³ ja ^{137}Cs -pitoisuus 12 Bq/m³ (7 tunnin keskiarvo).

Taulukossa III käytetään yksinkertaistettuja sääolosuhteita siten, että päästöpilven oletetaan kulkeutuvan suoraviivaisesti tiettyyn suuntaan vakionopeudella tietyssä ilmakehän stabiiliustilanteessa. Stabiilius kuvaa sitä, kuinka voimakasta ilman turbulentti sekoittuminen on. Se ilmaistaan usein stabiiliusluokkien A–F avulla. Stabiiliusluokka voidaan määrittää tuulen nopeuden, auringon korkeuskulman ja pilvisyyden avulla, lisäksi luokitteluun vaikuttaa se, onko maanpinta lumen peitossa. Päivällä lumettomana aikana esiintyy stabiiliusluokkia A–D ja lumisena aikana C–F. Yöllä esiintyy luokkia D–F. Voimakkaalla tuulella (> 6 m/s 10 m korkeudella) stabiiliusluokka on aina D.

Hiukkaset ja kaasut kulkeutuvat päästöpaikalta nopeammin kuin mitä läheltä maan pintaa mitatun pintatuulen nopeuden perusteella voisi päätellä, sillä tuulen nopeus on korkealla suurempi (Taulukko IV). Tarkastelussa käytetty tuulen nopeus on keskimääräinen pilven etenemisnopeus, eli suurempi kuin pintatuulen nopeus. Tuulen suuntakin vaihtelee paikallisesti ja ajallisesti, joten päästö ei kulkeudu esim. 100 km päähän täysin suoraviivaisesti. Kulkeutumisen aikana pilvi leviää sekä pysty- että vaakatasossa ulkoilman luontaisen turbulentin sekoittumisen johdosta. Mitä suurempaan ilmamassaan päästö sekoittuu, sitä pienempi on pitoisuusilmakuutiometriä kohti. Liitteessä 1 on esimerkki päästön kulkeutumisesta realistisessa säätilanteessa.

2.4 Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraalin arvioiminen jälkeinpäin laskeumamittauksista

Aktiivisuuspitoisuutta ilmassa mitataan jatkuvasti vain harvoilta paikkakunnilta. Toisaalta poikkeuksellisen säteilytilanteen jälkeen kartoitetaan laajoilta alueilta laskeuman aktiivisuus pinta-alaa kohti S (Bq/m²). Jos radioaktiiviset aineet tulivat maahan kuivalaskeumana (ei sadetta), voidaan aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali laskea seuraavasti,

Taulukko III. a) Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali (Bq s/m^3) maanpinnan tasolla eri etäisyyksillä päästöpaikasta sekä b) Aktiivisuuspitoisuus (Bq/m^3) ilmassa tilanteen aikana kun päästön vapautumisnopeus (Bq/s) pysyy vakiona. Päästön suuruus on 10^{17} Bq ja päästökorkeus 100 m. Kirjaimet A, D ja F ovat ilmakehän stabiiliusluokkia. Stabiiliusluokan perässä on ilmoitettu tuulen nopeus. Oletetaan, että päästöpilvi ei nouse sekoituskorkeuden yläpuolelle, joka on 1200 m (stabiiliusluokka A), 1500 m (D) ja 250 m (F). Otosaika kuvaa päästön kestoaikaa. Tilanteessa "Tuulee tasaisesti joka suuntaan" tuulen suunta muuttuu siten, että päästöstä kulkeutuu yhtä suuri osuus kaikkiin suuntiin.

a)

Etäisyys, km	Otos aika 1 h Suoraan tuulen alla			15° sivussa			Otos aika 24 h Suoraan tuulen alla			15° sivussa			Tuulee tasaisesti joka suuntaan (otosaika mikä tahansa).		
	A	D	F	A	D	F	A	D	F	A	D	F	A	D	F
	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s
10	$6 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$
30	$2 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$
50	$2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^1$	$8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$
100	$9 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^8$
150	$7 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$	$9 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^8$
200	$5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$

b)

Etäisyys, km	Otos aika 1 h Suoraan tuulen alla			15° sivussa			Otos aika 24 h Suoraan tuulen alla			15° sivussa		
	A	D	F	A	D	F	A	D	F	A	D	F
	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s	2 m/s	7 m/s	2 m/s
10	$2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^0$
30	$7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^{-3}$
50	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^{-4}$
100	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^{-8}$
150	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^1$	$8 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-11}$
200	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-14}$

$$C_A = \frac{S}{v_d}, \quad (3)$$

missä v_d on depositionopeus, jonka arvo riippuu mm. hiukkasen koosta sekä sääolosuhteista. Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraalin arvioiminen jälkikäteen on kuitenkin hyvin epäluotettavaa, koska depositionopeus voi vaihdella useita kertaluokkia. Pienimmillään hiukkasen depositionopeus voi olla luokkaa 10^{-4} m/s (poikkeuksena jään kaltaiset tasaiset pinnat stabiileissa sääolosuhteissa, jolloin se voi olla 10^{-6} m/s) (Sehmel, 1980). Pienhiukkasten depositionopeus pellolle kasvukaudella on luokkaa 10^{-3} m/s. Halkaisijaltaan alle $1 \mu\text{m}$ hiukkasten depositionopeus on enintään $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Jos oletetaan, että $v_d > 10^{-4}$ m/s, saadaan yläraja-arvio C_A :lle,

$$C_A < S \cdot 10000 \text{ s/m}. \quad (4)$$

Suuremmille kuin halkaisijaltaan $0,3 \mu\text{m}$ hiukkasille pätee, että depositionopeus on sitä suurempi mitä suurempi hiukkanen on. Esimerkiksi $10 \mu\text{m}$ hiukkasen depositionopeus on noin 10^{-2} m/s. Tätä suuremmat hiukkaset laskeutuvat maan vetovoiman vaikutuksesta eikä niiden depositionopeus juurikaan riipu sääolosuhteista. Halkaisijaltaan $100 \mu\text{m}$ hiukkasen depositionopeus on $0,3 \text{ m/s}$ jos sen tiheys on 1 g/cm^3 eli sama kuin veden tiheys (Hinds, 1999).

Jos radioaktiiviset aineet tulevat maahan sateen mukana, on suhde C_A/S paljon pienempi kuin kuivalaskeuman tapauksessa. Sade siis puhdistaa ilman tehokkaasti hiukkasista. Sateella maahan tulee myös korkealla ilmassa olleita radioaktiivisia aineita. Tällöin aktiivisuuspitoisuus maan pinnan lähellä olevassa ilmassa on saattanut olla hyvinkin vähäinen, vaikka laskeuman aktiivisuus olisi ollut suuri.

Resuspensio on prosessi, jossa maahan kertaalleen laskeutuneet hiukkaset nousevat uudelleen ilmaan esim. tuulen vaikutuksesta. Radioaktiivisten aineiden pitoisuus ilmassa on tällöin kuitenkin hyvin pieni verrattuna pitoisuuteen alkupe räisessä päästöpilvessä. Se saadaan kertomalla S resuspensiokertoimella r (yksikkö $1/\text{m}$),

$$c_{A,r} = S \cdot r \quad (5)$$

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen määritettiin resuspensiokertoimelle yhtälö

$$r = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \cdot e^{-0,002 \cdot t}, \quad (6)$$

missä t on aika laskeumahetkestä vuorokausina (Nair ym., 1997; IAEA 1994). Yhtälön (6) mukaan resuspensiokerroin on alussa $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ ja pienenee ajan myötä. Jos $v_d = 0,01 \text{ m/s}$ ja $r = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$, on resuspension aiheuttama aktiivisuuspitoisuus alkuperäinen C_A kerrottuna tekijällä $2 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Edelleen jos alkuperäinen päästöpilvi oli paikkakunnalla 14 tunnin ajan, on resuspension aiheuttama aktiivisuuspitoisuus ilmassa sadastuhannesosa pitoisuudesta alkuperäisen päästöpilven ylikulkeutumisen aikana.

Taulukko IV. Tyypillinen tuulen nopeus (m/s) eri korkeuksilla maan pinnasta erilaisissa ilmakehän stabiiliustilanteissa, kun 2 metrin korkeudelta mitatun pintatuulen nopeus on 3 m/s (Hanna, ym., 1982; Irwin, 1979).

Stabiiliusluokka		Korkeus maan pinnalta		
		2 m	10 m	100 m
A	Erittäin labiili	3,0	3,4	3,9
B	Labiili	3,0	3,4	3,9
C	Lievästi labiili	3,0	3,5	4,4
D	Neutraali	3,0	3,8	5,4
E	Lievästi stabiili	3,0	5,3	11,8
F	Stabiili	3,0	7,3	25,8

3 Koagulaatio

Koagulaatiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä ilmassa olevien hiukkasten törmäämistä ja kiinnittymistä toisiinsa. Törmäyksiä aiheuttaa mm. hiukkasten satunnainen ns. Brownin liike, jota kaikki ilmassa olevat hiukkaset kokevat. Brownin liikkeen aiheuttamaa koagulaatiota kutsutaan termiseksi koagulaatioksi. Turbulentissa virtauksessa hiukkasia törmäyttävät lisäksi ilmapyörteet, josta aiheutuvaa koagulaatiota kutsutaan turbulentiksi koagulaatioksi. Ilmavirtaus on turbulenttia silloin kun ilman tilavuusvirtaus on suuri ja/tai kun ilma virtaa nopeasti, kuten on asian laita kun teollisuusprosesseissa kuljetetaan tuotehiukkasia ilmassa.

Tarkastellaan tilannetta, jossa ilmassa on kahdenkokoisia hiukkasia; radioaktiivisesta päästöstä peräisin olevia radioaktiivisia aineita sisältäviä hiukkasia (merkitään alaindeksillä a) sekä tuotehiukkasia (esim. myllyprosessissa jauhahiukkasia, alaindeksi j). Koagulaation aiheuttamien törmäysten tapahtumistiheys tilavuusyksikköä kohti J_{aj} (kpl/(m³·s)) riippuu hiukkasten pitoisuuksista N_a ja N_j (kpl/m³) sekä koagulaatiokertoimesta K_{aj} (m³/s) (Seinfeld ja Pandis, 1998),

$$J_{aj} = K_{aj} N_a N_j. \quad (7)$$

Kappaleessa 3.1 tarkastellaan koagulaatiokertoimen arvioimista, ja kappaleessa 3.2 tuotehiukkasiin kertyvän aktiivisuuspitoisuuden määrittämistä, kun koagulaatiokertoimen arvo tunnetaan.

3.1 Koagulaatiomekanismeja

Seuraavassa käydään läpi ilmaa käyttävän teollisuuden kannalta oleelliset koagulaatiomekanismit.

Terminen koagulaatio

Seisovassa ilmassa tai ilmavirtauksessa olevat hiukkaset kokevat satunnaista, ns. Brownin liikettä kun kaasumolekyylit osuvat hiukkasiin tönien niitä. Satunnaisesti liikkuvat hiukkaset ajoittain osuvat toisiinsa. Termisestä koagulaatiosta aiheutuvan koagulaatiokertoimen arvo on (Hinds, 1999):

$$K_{aj} = \pi(d_a D_a + d_a D_j + d_j D_a + d_j D_j), \quad (8)$$

missä a - ja j -kokoluokkien hiukkasten halkaisijat ovat d_a ja d_j . Kokoluokan i hiukkasen diffuusiokertoimen D_i (m²/s) arvo on sitä pienempi mitä suurempi

hiukkanen on, koska kaasumolekyylien törmäykset liikuttavat hiukkasta sitä vähemmän mitä isompi se on.

$$D_i = \frac{kTC_{c,i}}{3\pi\eta d_i}, \quad (9)$$

$$C_{c,i} = 1 + \frac{\lambda}{d_i} \left(2,34 + 1,05 \exp -0,39 \frac{d_i}{\lambda} \right),$$

missä k on Boltzmannin vakio ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T on lämpötila ilmaistuna Kelvinasteissa, $C_{c,i}$ on kokoluokan i hiukkasen ns. liukukorjauskerroin, η on dynaaminen viskositeetti (ilman viskositeetti 20°C lämpötilassa on $1,81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s) ja λ on kaasun vapaa matka ($0,066 \mu\text{m}$ ilmalle 20°C lämpötilassa ja 101 kPa paineessa). Koagulaatiokertoimen yhtälöä saadaan yksinkertaistettua seuraavasti, kun oletetaan jauhahiukkasten olevat paljon suurempia kuin aktiivisten hiukkasten ($d_j \gg d_a$), jolloin

$$K_{aj} = \pi d_j D_a = \frac{d_j kTC_{c,a}}{3d_a \eta} \quad (10)$$

Yhtälö (10) pätee pyöreille hiukkasille, joilla ei ole merkittävää sähköistä varausta. Sekä epäpyöreys että sähköinen varautuminen yleensä jonkin verran kasvattavat koagulaatiokertoimen arvoa (paitsi jos hiukkaset ovat samanmerkkisesti varautuneita), mutta eivät yleensä kuitenkaan moninkertaista sitä (Hinds, 1999).

Turbulentti koagulaatio

Turbulentissa virtauksessa ilma ei liiku suoraviivaisesti eteenpäin, vaan virtaukseen muodostuu pyörteitä. Pyörteet aiheuttavat hiukkasten liikettä toistensa suhteen, mikä aiheuttaa hiukkasten välisiä törmäyksiä. Esimerkiksi jauhomyllyssä tuotteita kuljetettaessa virtaus on voimakkaasti turbulenttia. Turbulentin koagulaation aiheuttama koagulaatiokerroin on (Seinfeld ja Pandis, 1998)

$$K_{aj} = \sqrt{\frac{\pi \rho \epsilon_k}{120 \eta}} (d_a + d_j)^3 \quad (11)$$

$$K_{aj} \approx \sqrt{\frac{\pi \rho \epsilon_k}{120 \eta}} d_j^3, \text{ kun } d_j \gg d_a,$$

missä ρ on kaasun tiheys (kg/m^3) ja ε_k liike-energian muuttumisnopeus lämmöksi kaasun massayksikköä kohti (yksikkö J/kg/s , eli m^2/s^3). Koagulaatiokertoimen arvo ei siis riipu aktiivisten hiukkasten koosta silloin kun jauhahiukkaset ovat paljon suurempia kuin aktiiviset hiukkaset, eli kun $d_j \gg d_a$. Tyypilliset suureen $(\rho \varepsilon_k / \eta^2)^{1/2}$ mitatut arvot ovat luokkaa 10 s^{-1} , joten karkea arvio koagulaatiokertoimelle saadaan seuraavasti,

$$K_{aj} \approx 1,6 \text{ s}^{-1} \cdot d_j^3, \text{ kun } d_j \gg d_a. \quad (12)$$

Tekijän ε_k arvo riippuu virtausolosuhteista, joten sille ei ole olemassa tarkkaa yleispätevää arvoa.

Painovoiman aiheuttama koagulaatio

Pystysuoraan alaspäin suuntautuvassa virtauksessa suuret hiukkaset putoavat nopeammin (ja ylöspäin suuntautuvassa virtauksessa nousevat hitaammin) kuin pienet hiukkaset. Nopeuserot aiheuttavat hiukkasten törmäyksiä toisiinsa. Ilmiö on merkittävä sateella, jolloin sadepisarat keräävät allaan olevia aerosolihiukkasia mukaansa pudotessaan maahan.

Jauhomylyissä tilanne on vastaava silloin kun tuotehiukkasia pudotetaan alaspäin seisovan ilman läpi. Jos ilmassa on aktiivisia pienhiukkasia, ne koaguloituvat putoavien tuotehiukkasten kanssa. Koska ilmapirtausta ei ole, ja pienhiukkaset ovat liian pieniä pudotukseen itsestään alas, jäävät ne ilmaan leijumaan siihen asti kunnes ylhäältä päin törmäävä iso tuotehiukkanen vie ne mukanaan. Tämä koagulaatiomekanismi ei kuitenkaan liene kovin merkittävä, koska ilmapirtauksen puuttuessa ei uusia aktiivisia hiukkasia juurikaan kulkeudu seisovaan ilmaan.

3.2 Koagulaation aiheuttama aktiivisuuspitoisuus tuotehiukkasissa

Seuraavassa johdetaan yhtälöt, joiden avulla voidaan arvioida kuinka nopeasti ilmassa olevat radioaktiiviset hiukkaset koaguloituvat tuotehiukkasten kanssa, ja mikä tällöin tulee tuotehiukkasten aktiivisuuspitoisuudeksi.

Aktiivisia hiukkasia sisältävän ilman aktiivisuuspitoisuus c_A (Bq/m^3 ilmaa) on a-tyypin hiukkasten lukumäärä tilavuusyksikössä ilmaa N_a (kpl/m^3) kerrottuna yksittäisen a-tyypin hiukkasen aktiivisuudella A_a (Bq),

$$c_A = N_a A_a. \quad (13)$$

Yksittäiseen j -tyypin hiukkaseen törmänneiden α -tyypin hiukkasten lukumäärä n kasvaa ajan t kuluessa seuraavasti:

$$\frac{dn}{dt} = K_{aj} N_a \quad (14)$$

Yksittäisen j -tyypin hiukkasen aktiivisuus A_j kasvaa törmäysten seurauksena seuraavasti:

$$\begin{aligned} \frac{dA_j}{dt} &= \frac{dn}{dt} A_a = K_{aj} N_a A_a \\ \Rightarrow A_j &= K_{aj} A_a \int N_a dt \end{aligned} \quad (15)$$

Ilmassa olevien α -tyypin hiukkasten lukumääräpitoisuus vähenee törmäysten seurauksena,

$$\begin{aligned} \frac{dN_a}{dt} &= -J_{aj} = -K_{aj} N_a N_j \\ \Rightarrow N_a &= N_a(0) \cdot \exp(-K_{aj} N_j t), \end{aligned} \quad (16)$$

missä $N_a(0)$ on N_a hetkellä $t = 0$. Tästä saadaan edelleen

$$\begin{aligned} A_j &= K_{aj} N_a(0) A_a \int \exp(-K_{aj} N_j t) \cdot dt \\ &= K_{aj} c_A \int \exp(-K_{aj} N_j t) \cdot dt \end{aligned} \quad (17)$$

Alkuehdolla $A_j(t=0) = 0$ on yksittäisen j -tyypin hiukkasen aktiivisuus

$$A_j = \frac{c_A}{N_j} (1 - \exp(-K_{aj} N_j t)). \quad (18)$$

Tuotteen aktiivisuuspitoisuus α , eli aktiivisuus tuotekiloa kohti (Bq/kg), on sama kuin yksittäisen tuotehiukkasen aktiivisuus jaettuna sen massalla m ,

$$\alpha = \frac{A_j}{m} = \frac{c_A}{mN_j} (1 - \exp(-K_{aj} N_j t)). \quad (19)$$

Ilmaistaan edellinen yhtälö käyttäen tuotteen massapitoisuutta ilmassa (M , yksikkö kg/m³)

$$M = mN_j = \frac{\pi d_j^3 \rho_j}{6} N_j, \quad (20)$$

missä ρ_j on tuotehiukkasten tiheys. Tuotehiukkasten aktiivisuuspitoisuus on siis

$$\Rightarrow \alpha = \frac{c_A}{M} (1 - \exp(-X \cdot M \cdot t)), \quad (21)$$

$$\text{missä } X = \frac{6K_{aj}}{\pi d_j^3 \rho_j}$$

Jos turbulentti koagulaatio on hallitseva koagulaatiomekanismi ja $d_j \gg d_a$, saadaan X :n arvolle arvio sijoittamalla lauseke (12) X :n yhtälöön;

$$X = \frac{6K_{aj}}{\pi d_j^3 \rho_j} \approx \frac{6}{\pi d_j^3 \rho_j} 1,6 s^{-1} \cdot d_j^3 \approx 0,0031 m^3 kg^{-1} s^{-1}. \quad (22)$$

Kun tuote sisältää eri kokoisia hiukkasia, on niiden aktiivisuuspitoisuus eri kokoluokkien massaosuuksilla painotettu keskiarvo. Jos tuotehiukkaset jaetaan i kpl eri kokoluokkaan, saadaan X tällöin seuraavasti:

$$X = \frac{6}{\pi} \sum_i \frac{m_i K_{ai}}{d_i^3 \rho_i}, \quad (23)$$

missä m_i on kokoluokkaa i olevien hiukkasten osuus tuotteen kokonaismassasta. Yhtälöstä (21) saadaan seuraavat erikoistapaukset:

a) Jos tuotehiukkaset ja aktiiviset hiukkaset ovat samassa ilmatilavuudessa hyvin pitkän aikaa ($t \rightarrow \infty$), kiinnittyvät kaikki aktiiviset hiukkaset tuotehiukkasiin. Tuotteen aktiivisuuspitoisuus on tällöin

$$\alpha = \frac{c_A}{M}. \quad (24)$$

b) Jos tuote ja aktiiviset hiukkaset ovat samassa ilmassa niin lyhyen aikaa, että vain pieni osa aktiivisista hiukkasista on ehtinyt kiinnittyä tuotehiukkasiin, voidaan yhtälöä (21) supistaa muotoon

$$\zeta \mid X \dot{c}_A t. \quad (25)$$

Aika, joka kuluu siihen, että puolet ilman aktiivisista hiukkasista koaguloituu tuotehiukkasiin ($t_{50\%}$) saadaan sijoittamalla $\alpha = 0,5 \cdot c_A / M$ yhtälöön (21),

$$t_{50\%} = \frac{\ln(2)}{X \cdot M} \approx \frac{0,69}{X \cdot M}. \quad (26)$$

Jos turbulentti koagulaatio on hallitseva koagulaatiomekanismi ja $d_j \gg d_a$, saadaan yhtälön (22) avulla

$$t_{50\%} \approx \frac{\ln(2)}{0,0031 \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}) \cdot M} \approx \frac{220 (\text{kg s}) / \text{m}^3}{M}. \quad (27)$$

Esimerkiksi jos tuotteen kuljetukseen käytetään yksi kuutiometri ilmaa tuotekiloa kohti, on $t_{50\%} \approx 220 (\text{kg} \cdot \text{s}) / \text{m}^3 / 1 \text{ kg/m}^3 \approx 220 \text{ s}$. Ilmassa olevista aktiivisista hiukkasista kiinnittyy siis puolet tuotteeseen noin neljässä minuutissa, jos aktiiviset hiukkaset ovat paljon pienempiä kuin tuotehiukkaset. Jos tuotehiukkaset ovat pieniä, on $t_{50\%}$ termisestä koagulaatiosta johtuen tätä lyhyempi.

4 Radioaktiivisten hiukkasten tarttuminen tuotehiukkasiin

Kappale 4.1 käsittelee ilmansuodatuksen vaikutusta teollisuuslaitoksen käyttämän ilman aktiivisuuspitoisuuteen. Ilmassa olevat radioaktiiviset hiukkaset voivat kiinnittyä tuotehiukkasiin koaguloitumalla ilmassa (kappale 4.2) tai poistoilman suodatuksessa (kappale 4.3), jos poistoilmassa olevat tuotehiukkaset kerätään talteen. Kappaleessa 4.4. käsitellään varastoitavina olevien tuotteiden saastumista ilmassa olevien radioaktiivisten hiukkasten laskeutuksessa niiden pinnalle.

4.1 Teollisuuslaitoksen käyttämän ilman aktiivisuus

Jos laitoksen käyttämä ilma on suodatettua, jää osa aerosolihiukkasista suodattimeen. Vähiten tehokkaasti suodattimeen jäävät 0,1–1 µm kokoiset hiukkaset, eli juuri se kokoluokka, johon ydinvoimalaitosonnettomuudessa vapautuvat cesium ja jodi rikastuvat. Suodatin kerää isoja hiukkasia (yli 1 µm) tehokkaammin, koska ne eivät pysty seuraamaan suodattimen läpi kulkevassa ilmavirtauksessa olevia jyrkkiä mutkia, vaan törmäävät ja takertuvat suodattimen kuituihin (tai suodattimille aiemmin kerääntyneisiin hiukkasiin). Alle 0,1 µm kokoiset hiukkaset puolestaan törmäävät ja pidättyvät suodattimen kuituihin satunnaisen diffuusioliikkeensä seurauksena, ja pidättyvät sitä todennäköisemmin mitä pienempiä ovat.

Teollisuusprosesseissa tuloilman puhdistukseen usein käytettävät EU3–EU5 luokan suodattimet keräävät tehokkaasti isoja hiukkasia (> 1 µm), mutta saattavat päästää lävitseen kymmeniä prosentteja, jopa yli puolet 0,1–1 µm hiukkasista. Tavalliset suodattimet eivät myöskään poista kaasumaista jodia. Siihen tarvittaisiin esim. aktiivihilisuodattimia, jollaisia käytetään mm. ydinvoimalaitosten suojarakennuksissa.

Kaikki ulkoilman hiukkaset eivät pääse etenemään sisäilmaan, vaikka suodattimia ei käytettäisikään. Erityisesti suurten hiukkasten pitoisuudet ovat sisällä pienempiä kuin ulkona, koska ne suodattuvat pieniä helpommin, kun sisään tuleva ilma kulkee kapeiden ja mutkikkaiden rakojen kautta.

Teollisuusprosessiin ilman mukana tuleva kokonaisaktiivisuus A_{in} (Bq) saadaan seuraavasti:

$$A_{in} = \int_{t_{alku}}^{t_{loppu}} c_A V f \, dt \quad (28)$$

missä c_A on ulkoilman aktiivisuuspitoisuus, V on käytettävän ilman tilavuusvirtaus (m^3/s) ja f on tutkittavan aineen pitoisuus sisäilmassa jaettuna sen pitoisuudella ulkoilmassa. Tuloilman suodatus pienentää kertoimen f arvoa, mutta suodatetussakin ilmassa pienhiukkasissa esiintyvien aineiden osalta f voi olla suurempi kuin 0,1. Kaasumainen jodi ei tavalliseen ilmansuodattimeen pidäty, joten $f = 1$.

Jos V ja f säilyvät vakiona koko tilanteen ajan, saadaan yhtälöstä (28) edelleen

$$A_{in} = C_A V f \Delta t \quad (29)$$

Aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali C_A onkin käyttökelpoinen suure nimenomaan arvioitaessa tarkasteltavaan prosessiin tulevien radioaktiivisten aineiden kokonaismäärää.

4.2 Radioaktiivisten hiukkasten tarttuminen tuotehiukkasiin ilmassa koaguloitumalla

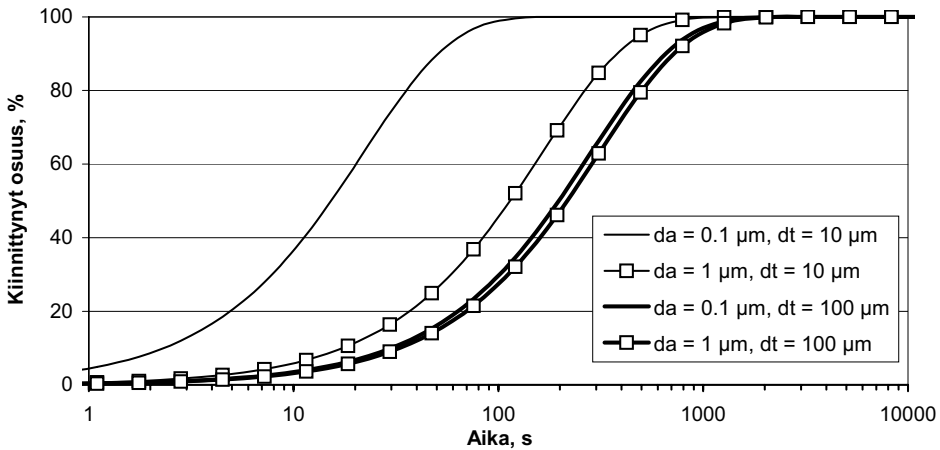
Aktiivisten hiukkasten kanssa koaguloitumalla kertynyt tuotehiukkasten aktiivisuuspitoisuus voidaan laskea kappaleessa 3.2. johdettujen yhtälöiden avulla. Tuotehiukkasten aktiivisuuspitoisuus kasvaa alussa nopeasti, mutta vauhti hidastuu sitä mukaa kun kiinnittymättömien aktiivisten hiukkasten pitoisuus ilmassa pienenee (Kuva 2). Aktiivisuuspitoisuuden yläraja-arvio saadaan olettamalla, että kaikki tehtaan käyttämässä ilmassa olevat aktiiviset hiukkaset kiinnittyvät tuotehiukkasiin. Tällöin tuotteen aktiivisuuspitoisuudeksi $\alpha(\text{Bq/kg})$, tulee

$$\alpha = \frac{c_A f}{M} = \frac{c_A V f}{Q} \quad (30)$$

missä c_A on aktiivisuuspitoisuus myllyn käyttämässä ilmassa (yhtälö 28), M on tuotehiukkasten massapitoisuus ilmassa (kg/m^3), V on käytettävän ilman tilavuusvirtaus (m^3/s) ja Q on tuotehiukkasten massavirtaus (kg/s).

Kappaleen 3 tarkastelu koskee hiukkasina ilmassa olevia aineita. Tarkastelu pätee myös kaasuille, mutta tällöin koagulaatiokerrointa ei voi laskea kappaleen 3.2 yhtälöistä. Yhtälön (9) mukaan kaasumolekyylit, joiden tyypilli-

nen koko on $0,0004 \mu\text{m}$, törmäävät tuotehiukkasiin tiuhaan tahtiin pienen kokonsa vuoksi. Törmäykset eivät kuitenkaan yleensä johda kaasumolekyylin pysyvään tarttumiseen hiukkaseen. Kaasumaisen jodin osalta kiinnittymisnopeus riippuu sekä jodin kemiallisesta olomuodosta (epäorgaaninen jodi kiinnittyy pinnoille yleensä tehokkaammin kuin orgaaninen) että tuotehiukkasten koostumuksesta. Jalokaasut, kuten krypton ja xenon, eivät kiinnity hiukkasiin.



Kuva 2. Aktiivisten hiukkasten kiinnittyminen tuotehiukkasiin, kun tuotehiukkasten massapitoisuus ilmassa on 1 kg/m^3 (yhtälö 21). Terminen ja turbulenti koagulaatio on huomioitu. d_a = aktiivisten hiukkasten halkaisija ja d_t = tuotehiukkasten halkaisija.

Suurikokoiset tuotehiukkaset. Jos kaikki tuotehiukkaset ovat vähintään muutaman kymmenen mikrometrin kokoisia, pätee

$$X = 0,003/s \text{ } \left[\text{kg}/\text{m}^3 \right], \text{ kun } d_j \gg 10 \mu\text{m}$$

$$\text{ja } t_{50\%} = \frac{220/s \text{ } \left[\text{kg}/\text{m}^3 \right]}{M}, \text{ kun } d_j \gg d_a \text{ ja } \psi_j \neq 1000 \text{ kg/m}^3. \quad (31)$$

Yhtälö (31) pätee vaikka tuotehiukkaset eivät olisikaan keskenään samankokoisia.

Pienet tuotehiukkaset. Jos tuotehiukkaset ovat pieniä, riippuu X :n arvo yhtälön (21) mukaisesti sekä tuotehiukkasten että aktiivisten hiukkasten koosta (Kuva 3 ja Taulukko V). Taulukossa VI on esitetty taulukon V X :n arvoja vastaavat $t_{50\%}$ arvot. Mitä pienempiä tuotehiukkaset ovat, sitä suurempi X :n

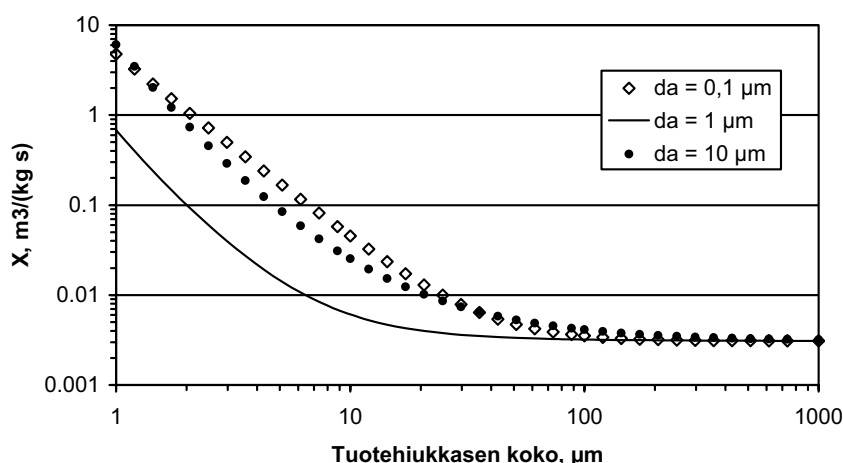
arvo on. Ero voi olla hyvin suuri, koagulaationopeus $1\ \mu\text{m}$ tuotehiukkasiin on enimmillään yli tuhat kertaa suurempi kuin isoihin hiukkasiin. Tuotehiukkasten koko on tuotteen aktiivisuuspitoisuuden kannalta ratkaiseva kuitenkin vain jos hiukkaset viipyvät saastuneessa ilmassa vain lyhyen ajan. Jos viipymäajan t ja massapitoisuuden M_j tulo on riittävän suuri, ei tuotehiukkasten koolla ole merkitystä, koska kaikki aktiiviset hiukkaset ehtivät joka tapauksessa kiinnittyä. Jos $t \cdot M_j$ on suurempi kuin noin $200\ (\text{s} \cdot \text{kg})/\text{m}^3$ ($\rho = 1000\ \text{kg}/\text{m}^3$), ehtii puolet aktiivisista hiukkasista kiinnittyä suurikokoisiinkin tuotehiukkasiin.

Taulukko V. Kertoimen X (yhtälö 21) arvoja radioaktiivisia aineita sisältävien hiukkasten halkaisijan (d_a) ja tuotehiukkasten halkaisijan (d_i) funktiona. Yksikkö on $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s})$. Tuotehiukkasten tiheydelle ρ_j on käytetty arvoa $1000\ \text{kg}/\text{m}^3$, mikä suunnilleen vastaa jauhojen tiheyttä.

$d_a\ (\mu\text{m})$	$d_i = 1\ \mu\text{m}$	$d_i = 10\ \mu\text{m}$	$d_i = 100\ \mu\text{m}$	$d_i = 200\ \mu\text{m}$	$d_i = 300\ \mu\text{m}$
0,1	4,8	0,045	0,004	0,003	0,003
1	0,7	0,006	0,003	0,003	0,003
10	6,1	0,025	0,004	0,004	0,003

Taulukko VI. Aika (s), jonka kuluessa puolet aktiivisista hiukkasista ehtii kiinnittyä tuotehiukkasiin, jos tuotehiukkasia on $1\ \text{kg}$ ilmakeuutiometrissä ja niiden tiheys on $1000\ \text{kg}/\text{m}^3$.

$d_a\ (\mu\text{m})$	$d_i = 1\ \mu\text{m}$	$d_i = 10\ \mu\text{m}$	$d_i = 100\ \mu\text{m}$	$d_i = 200\ \mu\text{m}$	$d_i = 300\ \mu\text{m}$
0,1	0,15	15	197	217	221
1	1,02	114	217	221	222
10	0,11	27	168	194	203



Kuva 3. Tekijän X (eli tuotteeseen sekunnin aikana kertyvä aktiivisuuspitoisuus, jos ilmapitoisuus on $1\ \text{Bq}/\text{m}^3$) riippuvuus tuotehiukkasten ja aktiivisten hiukkasten koosta.

Erikokoiset tuotehiukkaset. Jos tuotehiukkaset eivät ole keskenään samankokoisia, jakautuvat aktiiviset hiukkaset epätasaisesti eri kokoihin hiukkasiin. Tuotteen kokonaisaktiivisuuspitoisuus on eri kokoluokkien aktiivisuuspitoisuuksien X_i massaosuuksilla m_i painotettu keskiarvo (yhtälö 23). Pienikin massaosuus mikrometrikokoluokan hiukkasia karkeiden seassa saattaa kasvattaa tuotteen aktiivisuuspitoisuutta ratkaisevasti. Jos karkeiden tuotehiukkasten joukossa on 10 % massaosuus 1 μm hiukkasia, saattaa tuotteen aktiivisuuspitoisuus olla satakertainen verrattuna pelkkiä karkeita hiukkasia sisältävään tuotteeseen (Taulukko VII.a). Toisaalta 10 μm tuotehiukkasten vaikutus on jo paljon pienempi (Taulukko VII.b).

Saastuneimman, alle 10 μm , hiukkaskokoluokan poistaminen tuotteesta saattaakin pienentää tuotteen aktiivisuuspitoisuutta huomattavasti. Toimenpiteen mahdollinen kielteinen vaikutus tuotteen ominaisuuksiin voi kuitenkin estää sen käyttämisen. Pienten hiukkasten poisto on tehtävä jo siinä vaiheessa kun tuote on vielä hiukkasina ilmassa. Se ei onnistu valmista tuotetta seulomalla, koska alle 1 μm hiukkaset ovat tällöin tarttuneet kiinni suurempiin. Eräs vaihtoehto on kerätä syrjään poistoilman suodattimelle jääneet hiukkaset (jotka ovat keskimääräistä pienempiä) sen sijaan että ne palautettaisiin prosessiin.

Taulukko VII. Yhden sekunnin aikana ilmassa oleviin tuotehiukkasiin siirtyvä aktiivisuus (Bq) kun ilman aktiivisuuspitoisuus on 1 Bq/m³ (eli tekijän X arvo). Tuotehiukkasten joukossa on 100 μm hiukkasten lisäksi a) 1 μm tai b) 10 μm hiukkasia.

a) Tuotehiukkaset 1 μm ja 100 μm kokoisia

d_a (μm)	1 μm hiukkasten osuus tuotehiukkasten massasta, %				
	0	5	10	30	100
0,1	0,004	0,24	0,48	1,4	4,8
1	0,003	0,04	0,07	0,2	0,7
10	0,004	0,31	0,61	1,8	6,1

b) Tuotehiukkaset 10 μm ja 100 μm kokoisia

d_a (μm)	1 μm hiukkasten osuus tuotehiukkasten massasta, %				
	0	5	10	30	100
0,1	0,004	0,006	0,008	0,016	0,045
1	0,003	0,003	0,003	0,004	0,006
10	0,004	0,005	0,006	0,010	0,025

Tuotehiukkasten koko muuttuu prosessin aikana. Aktiivisuuspitoisuuden ennakointi todellisessa prosessissa on vaikeaa edes kertaluokan tarkkuudella, koska se riippuu voimakkaasti sekä aktiivisten hiukkasten että tuotehiukkasten koosta. Lisäksi esimerkiksi jauhomyllyssä eri tuotehiukkasilla on eri suuruiset viipymäajat ilmassa, ja hiukkasten koko muuttuu kesken prosessin jauhamisen seurauksena. Tästäkin johtuen voidaan esittää vain karkeita arvioita aktiivisuuspitoisuudesta.

Lopputuotteessa olevien pienien hiukkasten osalta on ratkaisevaa niiden viipymäaika ilmassa sen jälkeen kun ne ovat jauhautuneet pieniksi, ja ilman aktiivisuuspitoisuus tällöin. Jauhomyllyssä ennen jauhamista jyvien pinnalle tarttuneet radioaktiiviset hiukkaset poistuvat jyviä kuorittaessa, joten pienien jyvien ydinosia sisältävien hiukkasten saastumiseen vaikuttaa vain jauhamisen jälkeen ilmassa vietetty aika. Toisaalta kuoriosien saastumista saatetaan aliarvioida, jos oletetaan pienten hiukkasten (joihin aktiiviset hiukkaset kiinnittyvät nopeammin kuin kuoriosien suuriin hiukkasiin) olleen ilmassa jo ennen kuorimista. Aliarviointi voidaan välttää olettamalla, ettei pieniä hiukkasia ole samanaikaisesti ilmassa. Tämä voidaan tehdä yksinkertaisimmin laskemalla aktiivisuuspitoisuus yhtälöstä (25), kuitenkin siten, että se ei voi olla suurempi kuin yhtälön (24) maksimiarvo. Pienten hiukkasten saastumiselle puolestaan saadaan yläraja-arvio olettamalla, ettei käytetyn ilman aktiivisuuspitoisuus ole ehtinyt pienentyä ennen kuin hiukkaset ovat jauhautuneet pieniksi. Jos hiukkasten viipymäaika ilmassa vaihtelee, on yhtälössä (25) käytettävä keskimääräistä viipymäaikaa.

4.3 Kiinnittyminen poistoilman suodattimessa

Poistoilma suodatetaan kun halutaan palauttaa prosessiin siinä olevat tuotehiukkaset. Poistoilman suodatustehokkuus esim. jauhomyllyssä on oletettavasti huomattavasti parempi (myös vaikeasti kerättävien alle 1 µm hiukkasten osalta) kuin sisään tulevan ilman suodatuksessa. Poistoilman suodattimen eteen kerääntyy paksu kerros tuotehiukkasia, jotka itsessään tehokkaasti suodattavat hiukkasia. Voidaan arvioida, että kaikki ne radioaktiivisia aineita sisältävät hiukkaset, jotka eivät ole kiinnittyneet tuotehiukkasiin aiemmin tekevät sen poistoilman suodatuksessa. Kaasumaisen jodin osalta pätee edellä esitetty varaus; nopeus, jolla ne adsorboituvat tuotehiukkasten pinnoille riippuu tuotehiukkasten pintaominaisuuksista.

Poistoilman suodattaminen lisää tuotteen saastumista, mutta se helpottaa saastumisen arvioimista; kaikkien sisään tulevien radioaktiivisia aineita sisältävien hiukkasten voi olettaa kiinnittyvän tuotteeseen. Tuotteen

aktiivisuuspitoisuutta voidaan arvioida yhtälön (30) avulla. Suodattimen puhdistusväli vaikuttaa kuitenkin siihen, kuinka suureen tuotemäärään aktiiviset hiukkaset sekoittuvat.

Joissakin jauhomyllyissä ilmasta erotetaan jauhohiukkaset syklonin avulla ennen kuin ilma johdetaan suodattimen läpi ulos. Sykloni kuitenkin läpäisee tiettyä rajakokoa pienemmät hiukkaset, jotka siis päätyvät poistoilman suodattimelle. Tästä johtuen on aihetta olettaa, että poistoilman suodattimelle kerääntyvän tuotteen aktiivisuuspitoisuus on keskimääräistä suurempi.

4.4 Varastoitavan raaka-aineen ja tuotteen saastuminen

Radioaktiiviset hiukkaset laskeutuvat maahan pääasiassa sateen mukana, joten sisävarastossa olevien tai muuten sateelta suojattujen raaka-aineiden tai tuotteiden saastuminen on vähäistä verrattuna maahan tulevaan radioaktiivisen laskeumaan. Jonkin verran saastumista tapahtuu, koska saastunutta ilmaa kulkeutuu ilmanvaihdon mukana varastotiloihin. Saastumista tapahtuu eniten, jos ilma pääsee virtaamaan tuotekerrosten läpi. Tuotteen pakkaaminen esim. laatikoihin tai peittäminen luonnollisesti vähentää saastumista.

Kuukausi Tshernobylin onnettomuuden jälkeen mitatut ^{137}Cs -aktiivisuuspitoisuudet viljavarastojen pintakerroksessa olivat Suomessa suuruusluokkaa 1 Bq/kg (Rantavaara ja Haukka, 1987). Tämän perusteella aktiivisuus neliömetriä kohti ilmaistuna oli karkeasti arvioiden 100 Bq/m², mikä on sadasosa siitä laskeumasta joka olisi kohdistunut ulkona olevaan suojaamattomaan tuotteeseen.

Erot aktiivisuuspitoisuudessa varaston eri osissa voivat olla huomattavia, koska aktiivisia aineita sisältävät hiukkaset jäävät lähelle varastoitavan tuotteen pintaa. Mitä huokoisempaa tuote on, sitä syvemmälle pienhiukkaset pystyvät kulkeutumaan ilmarakojen pitkin. Toisaalta tuotteen sekoittuminen varastossa tasoittaa sen aktiivisuuspitoisuutta eri syvyyksillä.

5 Jauhojen hiukkaskoko

Tuotteen ”tyypillinen” tai keskimääräinen hiukkaskoko on usein tiedossa. Tyypillisen hiukkaskoon avulla laskettu aktiivisuuspitoisuus on kuitenkin liian pieni, jos tuotteen joukossa on myös keskimääräistä kokoa selvästi pienempiä hiukkasia. Jauhojen osalta asiaa selvitettiin mittaamalla neljän eri myynnissä olevan jauhon hiukkaskokojakauma. Analysoidut jauhot olivat vehnä- ja ruisjauhoja, joista kummastakin analysoitiin hieno ja karkea jauho.

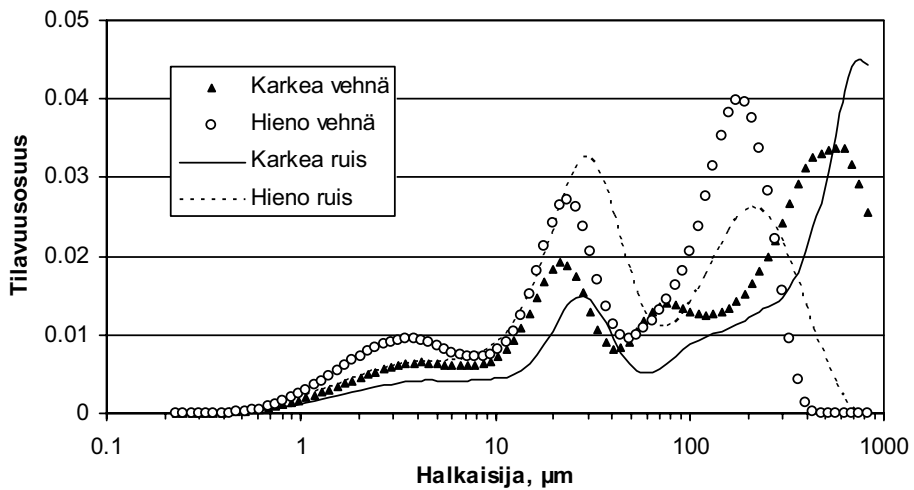
Mittaukset tehtiin laser-diffraktiomenetelmällä VTT Kemiantekniikan Mineraalitekniikan yksikössä. Kaupan jauhopusseista otetut näytteet sekoitettiin (dispergoitiin) natriumheksametafosfaatti-natriumkarbonaattivesiliuokseen, josta kokojakaumat mitattiin COULTER LS Particle Size Analyser-laitteella. Mitatut hiukkaskokojakaumat on esitetty kuvassa 4. Karkeassa ruisjauhossa oli runsaasti yli 900 μm (eli yli 0,9 mm) kokoisia hiukkasia, joita ei tällä menetelmällä voi havaita. Karkean ruisjauhon hiukkaskokojakauma mitattiin sen vuoksi myös seulomalla (Retsch 3D), josta saatua tulosta käytettiin kokoalueella yli 500 μm .

Kuva 5 ja taulukko VIII havainnollistavat sitä, minkä kokosiin tuotehiukkasiin aktiiviset hiukkaset kiinnittyisivät. Kuvan 5 y-akselin suure $dX/d \log(d)$ on laskettu kertomalla jauhojen tilavuusosuudet tekijällä $(6K_{ai})/(\pi d_i^3 \rho_i)$, jolloin käyrän alle jäävä pinta-ala on sama kuin yhtälön (21) tekijä X .

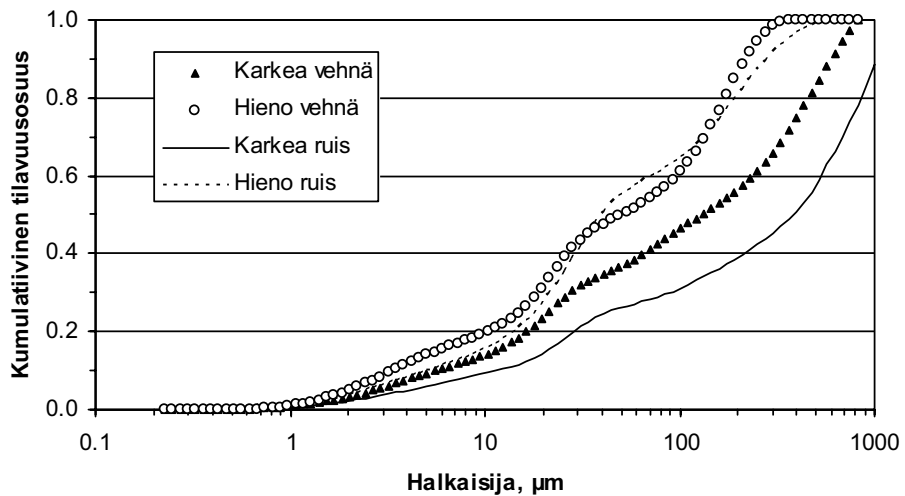
Kaikissa tapauksissa aktiiviset hiukkaset kiinnittyisivät lähes yksinomaan alle 10 μm kokosiin jauhohiukkasiin. Karkeiden ja hienojen jauhojen välillä ei ole kovin suurta eroa. Tämä johtuu siitä, että myös karkeiden jauhojen joukossa on runsaasti (10–15 %) alle 10 μm kokoisia hiukkasia. Aktiivisten hiukkasten kiinnittymisen kannalta ei ole merkittävää, että karkeat jauhot ovat pääosin karkeampia (yli 300 μm) kuin hienot jauhot (100–300 μm).

Kuvan 5 mukaan aktiivisista hiukkasista noin puolet kiinnittyisi jopa alle 1 μm jauhohiukkasiin. Tältä osin tulos on kuitenkin varsin epätarkka, koska alle 1 μm hiukkasten osuus jauhon kokonaismassasta on vähäinen, ja lisäksi ollaan lähellä käytetyn menetelmän mittausalueen alarajaa.

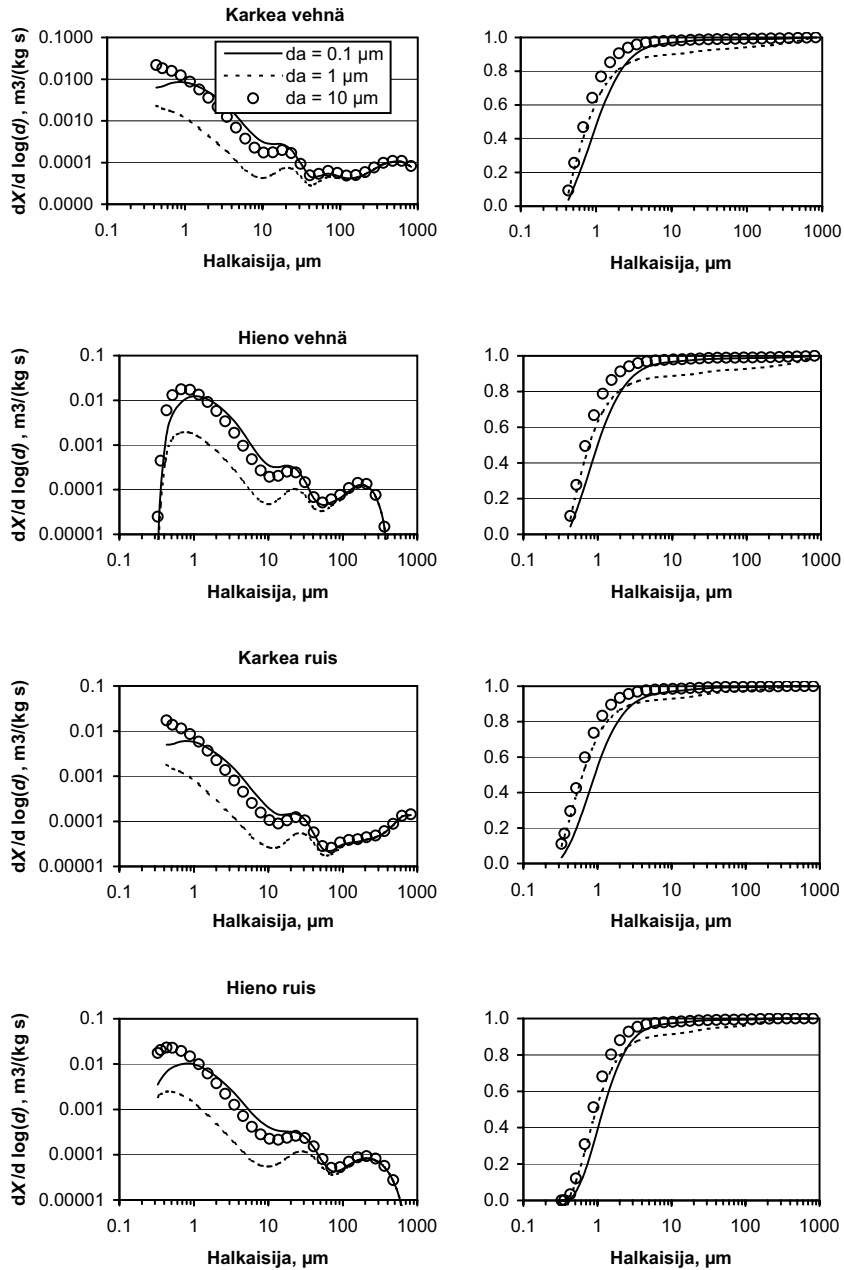
a)



b)



Kuva 4. Laserdiffraktiomenetelmällä määritetyt jauhojen hiukkas-kokojakaumat. Karkeiden ruisjauhojen osalta tulos on yhdistetty laserdiffraktio- ja seulatuloksista. Tulokset on esitetty a) differentiaalisesti ja b) kumulatiivisesti.



Kuva 5. Tilavuusosuuksilla painotettu tekijä X mitatuille jauhoille kolmella eri aktiivisten hiukkasten koolla esitettynä differentiaalisesti ja kumulatiivisesti. Käyrät kuvaavat sitä, minkä kokosiin tuotehiukkasiin aktiiviset hiukkaset koagulaation seurauksena kiinnittyisivät. Jauhohiukkasten tiheydelle on käytetty arvoa 1000 kg/m^3 .

Taulukko VIII. Kertoimen X (yhtälö 21) arvoja mitatuille neljälle jauholle, kun oletetaan kolme eri aktiivisten hiukkasten halkaisijaa d_a . Lisäksi on esitetty vastaavat kertoimet tasakokoiselle 100 μm hiukkasista koostuvalle jauholle, jonka seassa ei ole pienempiä hiukkasia. Tuotehiukkasten tiheydelle ρ_j on käytetty arvoa 1000 kg/m^3 , mikä suunnilleen vastaa jauhojen tiheyttä.

d_a μm	Vehnäjauho		Ruisjauho		Tasakokoinen (100 μm) jauho $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$
	Karkea $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$	Hieno $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$	Karkea $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$	Hieno $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$	
0,1	0,17	0,21	0,11	0,21	0,003
1	0,03	0,03	0,021	0,04	0,003
10	0,23	0,26	0,17	0,36	0,004

Esimerkki

Taulukon VIII jauhoja kuljetetaan 100 sekunnin ajan ilmassa, jossa on 0,1 μm kokoisia radioaktiivisia hiukkasia. Aktiivisuuspitoisuus ilmassa on 1000 Bq/m^3 . Arvioi jauhoihin kerääntyvä aktiivisuuspitoisuus.

Lasketaan jauhojen aktiivisuuspitoisuus α yhtälöstä $\alpha = X \cdot c_A t$, missä $c_A = 1000 \text{ Bq}/\text{m}^3$, $t = 100 \text{ s}$ ja X :n arvot saadaan taulukosta VIII:

Jauho	X , $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$	Jauhon aktiivisuuspitoisuus, Bq/kg
Karkea vehnäjauho	0,17	17000
Hieno vehnäjauho	0,21	21000
Karkea ruisjauho	0,11	11000
Hieno ruisjauho	0,21	21000
Tasakokoinen jauho, $d_j = 100 \mu\text{m}$	0,003	300

6 Toiminnasta valmiustilanteen aikana

Kappaleessa 6.1. käsitellään sitä, miten valmiustilanteen aikana käytettävissä oleva mittaustieto ulkoisen säteilyn annosnopeudesta on sovellettavissa ilmaa käyttävän elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Kappaleessa 6.2. käsitellään valmiustilanteen aikaisia toimenpiteitä jauhomylllyn kannalta.

6.1 Ulkoisen säteilyn annosnopeus

Päästöpilven kulkeutuessa paikkakunnalle ovat ensimmäiset käytettävissä olevat mittaustulokset ulkoisen säteilyn annosnopeuksia. Ulkoisen säteilyn annosnopeutta mitataan jatkuvatoimisesti n. 300 mittausasemalla eri puolella Suomea. Asema hälyttää, jos annosnopeus on suurempi kuin $0,4 \mu\text{Sv/h}$. Normaali luonnon taustasäteily on alle $0,3 \mu\text{Sv/h}$. Ohjeellisia toimenpidetasoja tilanteessa, jossa päästön koostumusta ei vielä tunneta ovat mm. $10 \mu\text{Sv/h}$, jolloin lasten tulisi nauttia joditabletteja ja $100 \mu\text{Sv/h}$, jolloin aikuisten tulisi nauttia joditabletteja ja sisällesuojautuminen on ajankohtaista (VAL 1.1, 2001). Todellisessa säteilytilanteessa toimenpidetasoja voi olla tarkoituksenmukaista muuttaa, kun tilanteen yksityiskohdista on riittävästi tietoa.

Ulkoisen säteilyn annosnopeuteen vaikuttavat sekä ilmassa olevat, että maan pinnalle mittauspaikeen lähistölle deponoituneet aineet. Alussa, kun päästöpilvi saapuu paikalle, on ulkoinen säteily peräisin ilmassa olevista aineista. Pilven mentyä ohi se aiheutuu laskeumasta. Ilman käytön kannalta annosnopeustietoa voidaan hyödyntää lähinnä tilanteen alkuvaiheessa, kun pilvi on tulossa paikkakunnalle eikä muuta mittaustietoa paikkakunnalta ole vielä käytettävissä. Ulkoisen säteilyn annosnopeuteen vaikuttavat monet radionuklidit, myös ne jotka eivät ole ilmaa käyttävän teollisuuden kannalta tärkeitä.

Ydinvoimalaitosonnettomuudet

Taulukossa IX esitetään ^{134}Cs ja ^{137}Cs -nuklidien aktiivisuuspitoisuus ilmassa, kun ulkoisen säteilyn annosnopeudeksi on mitattu $0,4 \mu\text{Sv/h}$, $10 \mu\text{Sv/h}$ tai $100 \mu\text{Sv/h}$. Tässä on oletettu, että kaikki ulkoinen säteily on peräisin ilmassa olevista aineista. Jos osa havaitusta säteilystä on peräisin laskeumasta, ovat pitoisuudet ilmassa taulukon IX arvoja pienempiä.

“Vain jalokaasuja ja jodia”-tilanteessa päästöpilvi ei sisällä ollenkaan cesiumia. Tapauksessa “100-10-1” päästöpilven koostumus vastaa tilannetta, jossa samanaikaisesti vapautuu jalokaasuista 100%, jodista ja cesiumista 10% sekä muista aineista 1% (kyseinen tapaus vastaa myös mitä tahansa muuta tilannetta, jossa jodin ja cesiumin vapautumisosuus on kymmenesosa, ja muiden aineiden sadasosa jalokaasujen vapautumisosuudesta). Tapauksessa “Jodi+cesium” vapautuu jodista ja cesiumista yhtä suuri osuus eikä ilmassa ole muita radioaktiivisia aineita. Lähellä tätä voi tilanne olla jos jalokaasut ja kaasumainen jodi ovat vapautuneet jo aiemmin ja kulkeutuneet muualle, mutta cesiumia vaikeammin höyrystyviä aineita ei ole ollenkaan vapautunut. “Pelkkä cesium” varmasti yliarvioi cesium-isotooppien pitoisuutta ilmassa, koska kaiken ulkoisen säteilyn oletetaan olevan niistä peräisin.

Jos $10 \mu\text{Sv/h}$ toimenpidetaso ei ylitä, on varsin epätodennäköistä, että ^{134}Cs :n ja ^{137}Cs :n aktiivisuuspitoisuus ilmassa on yli 1000 Bq/m^3 . Toisaalta hyvinkään suuri ulkoisen säteilyn annosnopeus ei välttämättä merkitse että tuotteet saastuvat pahoin; annosnopeus voi johtua ilmassa olevista jalokaasuista tai laskeumasta.

Taulukko IX. ^{134}Cs ja ^{137}Cs -nuklidien aktiivisuuspitoisuus ilmassa (Bq/m^3), kun päästöpilvestä aiheutuvan ulkoisen säteilyn (kaikki nuklidit yhteensä) annosnopeus on $0,4 \mu\text{Sv/h}$, $10 \mu\text{Sv/h}$ ja $100 \mu\text{Sv/h}$. Laskut on tehty VTT:n kehittämällä VALMA-ohjelmalla (kyseessä on esimerkkitapaus, lukuarvot riippuvat reaktorin nuklidikoostumuksesta).

Päästöpilven koostumus:	0,4 $\mu\text{Sv/h}$		10 $\mu\text{Sv/h}$		100 $\mu\text{Sv/h}$	
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs
Vain jalokaasuja ja jodia	0	0	0	0	0	0
100-10-1 *	23	15	570	390	5700	3900
Jodi + cesium	76	52	1900	1300	19000	13000
Pelkkä cesium	1100	770	28000	19000	280000	190000

*) Samanaikaisesti vapautuu jalokaasuista 100%, jodista ja cesiumista 10% sekä muista aineista 1%.

Esimerkki

Ydinvoimalaitosonnettomuudessa vapautuu ilmaan 30 % reaktorissa olleista jalokaasuista, 3 % cesiumista ja jodista sekä 0,3 % muista radioaktiivisista aineista. Onnettomuuden aiheuttama ulkoisen säteilyn annosnopeus eräällä paikkakunnalla on suurimmillaan $100 \mu\text{Sv/h}$. Arvioi kuinka suuri saastepilven ohikulkeutumisen aikana valmistettujen tuotteiden ^{134}Cs :n aktiivisuuspitoisuus voi olla. Tehdas käyttää ilmaa 1 m^3 tuotekiloa kohti ja oletetaan, että kaikki käytetyssä ilmassa olleet radioaktiiviset aineet siirtyivät tuotteeseen.

^{134}Cs :n pitoisuus ilmassa voidaan arvioida taulukon IX tapauksen “100-10-1” mukaan, eli $c_a(^{134}\text{Cs})$ oli suurimmillaan 5700 Bq/m^3 ja $c_a(^{137}\text{Cs})$ puolestaan

3900 Bq/m³. Lasketaan tuotteiden aktiivisuuspitoisuus yhtälöstä (30), missä $f = 1$ (arvioidaan pahinta mahdollista tapausta) ja $M = 1 \text{ kg/m}^3$,

$$^{134}\text{Cs} \left| \frac{5700 \text{ Bq/m}^3}{1 \text{ kg/m}^3} \right| \frac{5700 \text{ Bq/m}^3}{1 \text{ kg/m}^3}$$

Ydinaseräjähdykset ilmakehässä

Radioaktiivisten aineiden kulkeuduttua kokonaan paikkakunnan ohi aiheutuu ulkoisen säteilyn annosnopeus laskeumasta. Ydinaseräjähdelaskeuman suuruus voidaan arvioida lähteessä Glasstone ja Dolan (1977) annettujen tietojen avulla seuraavasti,

$$S(t) \approx 3 \cdot 10^{17} \cdot \dot{D}(t), \quad (32)$$

missä laskeuman aktiivisuuspitoisuus S (kaikki nuklidit yhteensä) on yksikössä Bq/m³ ja ulkoisen säteilyn annosnopeus $\dot{D}(t)$ yksikössä $\mu\text{Sv/h}$. Pilven ohikulkeutumisen aikainen aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali C_A puolestaan saadaan kertomalla laskeuman aktiivisuuspitoisuus depositionopeudella,

$$C_A \approx S_l \cdot v_d, \quad (33)$$

missä alaindeksi l viittaa ajankohtaan heti päästöpilven ohikulkeutumisen jälkeen.

Jos oletetaan sekä laskeuman että tuotteeseen kiinnittyneiden radionuklidien aktiivisuuden pienenevän yhtälön (1) mukaisesti, saadaan tuotteen aktiivisuuspitoisuus α laskettua yhtälöiden (30) ja (33) avulla seuraavasti,

$$m \approx \left(\frac{C_m}{C_l} \right)^{4.2} \approx C_a \left(\frac{C_m}{C_l} \right)^{4.2} \left(\frac{f}{M t_{\text{kulk}}} \right) \approx \frac{S_m}{v_d M t_{\text{kulk}}}, \quad (34)$$

missä t_{kulk} on päästöpilven ohikulkeutumiseen kuluva aika ja alaindeksi m viittaa laskeumamittauksen suoritusajankohtaan. Tekijää $C_a (t_m/t_l)^{-1.2}$ voidaan arvioida laskeuman aktiivisuuspitoisuuden avulla, tai tämän tiedon puuttuessa laskeuman aiheuttaman ulkoisen säteilyn annosnopeuden avulla (Taulukko X).

Yhtälössä (34) oletetaan, että laskeuman aktiivisuuspitoisuus pienenee samaa vauhtia kuin ilmasta saastuneiden tuotteiden aktiivisuuspitoisuus. Tämä pätee vain jos tuotetta saastuttavien hiukkasten nuklidikoostumus on sama kuin laskeuman. Lyhytikäiset radionuklidit voivat olla rikastuneet eri kokoiisiin aerosolihiukkasiin kuin pitkäikäiset, jolloin suureiden v_d ja f arvot saattavat olla eri suuruksia lyhyt- ja pitkäikäisille nuklideille. Tuotteiden aktiivisuuspitoisuudelle saadaan kuitenkin yläraja-arvio olettamalla että $f=1$ ja että v_d :n arvo on hyvin pieni (esimerkiksi 10^{-4} m/s). Yhtälö (34) voi antaa liian pienen arvon tuotteen aktiivisuuspitoisuudelle myös siksi, että laskeuman aktiivisuus pienenee muutoin kuin radioaktiivisen hajoamisen myötä, esimerkiksi sateen huuhtoessa aineita pois maan pinnalta.

Tuotantoprosessiin ilman mukana tullut radioaktiivisten aineiden kokonaismäärä A_{in} (Bq) voidaan arvioida ilman tietoa parametrin t_{kulk} arvosta (olettaen, että käytettävän ilman tilavuusvirtaus V (m³/s) on vakio). Yhtälöiden (29), (33) ja (34) avulla saadaan A_{in} :n arvoksi heti pilven ohikulkeutumisen jälkeen (t_l),

$$A_{in}/t_l = \frac{S/t_m}{t_m/t_l} \cdot v_d \cdot f, \quad (35)$$

sekä edelleen laskeuman mittaushetkellä (t_m),

$$A_{in}/t_m = S/t_m \cdot v_d \cdot f. \quad (36)$$

Taulukko X. Mitattua annosnopeutta vastaava ydinräjähdelaskeuma, kun annosnopeus aiheutuu ainoastaan laskeumasta (yhtälö 32), sekä yhtälössä (34) esiintyvä tekijä $C_a(t_m/t_l)^{-1.2}$ oletetuilla depositionopeuksilla. Yleensä $v_d > 0,0001$ m/s. Depositionopeus 0,1 m/s on realistinen sateella tai suurille lähilaskeuman hiukkasille.

Laskeuman aiheuttama annosnopeus	0,4 μ Sv/h	10 μ Sv/h	100 μ Sv/h
Laskeuma, Bq/m ²	1,2·10 ⁵	3,0·10 ⁶	3,0·10 ⁷
$C_a/t_m/t_l \cdot t_l^{1.2}$, (Bq/m ³)·s			
kun $v_d =$			
0,0001 m/s	1,2·10 ⁹	3,0·10 ¹⁰	3,0·10 ¹¹
0,01 m/s	1,2·10 ⁷	3,0·10 ⁸	3,0·10 ⁹
0,1 m/s	1,2·10 ⁶	3,0·10 ⁷	3,0·10 ⁸

Pilven ohikulkeutumisen aikana lähilaskeuma-alueella valmistetut tuotteet voivat olla aluksi hyvin aktiivisia, mutta aktiivisuuspitoisuus pienenee nopeasti ensimmäisten vuorokausien aikana. Esimerkiksi vuorokausi räjähdysten jälkeen valmistettujen tuotteiden aktiivisuus putoaa yhtälön (1) mu-

kaan viikossa kymmenesosaan ja seitsemässä viikossa sadasosaan. Lähilaskeuman alle jäävillä alueilla aktiiviset hiukkaset ovat luultavasti kookkaita eivätkä siten juurikaan siirry ulkoilmasta teollisuuden käyttämään ilmaan, vaikka ilmaa ei suodatettaisikaan. Pitkään varastoitavien tuotteiden osalta saastuminen ei ole ongelma, jos pilvi saapui alueelle ensimmäisten vuorokausien aikana ja annosnopeus ei noussut ihmisten suojautumistoimenpiteitä edellyttävälle tasolle.

Ulkona suojaamattomina varastoitavat raaka-aineet tai tuotteet voivat saastua lähilaskeumasta merkittävästi. Tällainen tilanne syntyi vuonna 1954, jolloin Bikinillä eräällä korallisaarella räjäytetyn 15000 kt räjähteen radionuklidit kiinnittyivät pääosin korallista ilmaan nousseisiin 20–500 µm hiukkasiin. 130 km päässä räjähdyspaikalta ollut kalastusalus Fukuryu Maru (Onnellinen lohikäärme) jäi lähilaskeuman alle. Mittauksissa osan kalansaaliista todettiin saastuneen. Tapaus sattui alueella, jossa ulkoinen annosnopeus olisi ehdottomasti edellyttänyt ihmisten suojaamista. Laivan saapuessa Japaniin osa sen miehistöstä kärsi tyypillisistä säteilysairauden oireista, ja eräs heistä kuoli kuusi kuukautta myöhemmin. Tapauksen seurauksena suuri määrä muidenkin laivojen saastumatonta kalaa jäi pilaantumaan (Eisenbud, 1973).

Jos pilvi saapuu alueelle useita vuorokausia räjähdysten jälkeen, ei tällöin valmistettujen tuotteiden aktiivisuus kovin nopeasti pienene varastoinnin aikana. Viikko räjähdysten jälkeen valmistettujen tuotteiden aktiivisuuden putoaminen kymmenesosaan kestää kuusi viikkoa. Useita vuorokausia ilmassa olleet hiukkaset ovat pienempiä – ja f :n arvo niille oletettavasti suurempi – kuin lähilaskeuman muodostavat hiukkaset.

Esimerkki

Ydinaseräjähdysten jälkeen mitataan laskeuman aiheuttamaksi ulkoisen säteilyn annosnopeudeksi 3,33 µSv/h.

a) Arvioi saastepilven ohikulkeutumisen aikana valmistettujen tuotteiden aktiivisuuspitoisuus laskeuman mittaushetkellä. Tehdas käyttää ilmaa 1 m³ tuotekiloa kohti ja oletetaan, että kaikki käytetyssä ilmassa olleet radioaktiiviset aineet siirtyivät tuotteeseen. Oleta, että radioaktiivisia aineita sisältävä pilvi kulkeutui tehtaan ohi 1 tunnin aikana, ja että depositionopeus oli 0,001 m/s.

Laskeuman aktiivisuuspitoisuus on yhtälön (32) mukaan

$$S_m \mid 3 \cdot 10^{17} \cdot 3,33 \mid 10^6 \text{ Bq/m}^2.$$

Tuotteiden aktiivisuuspitoisuus voidaan laskea yhtälöstä (34):

$$m \left| \frac{10^6 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{fi}}{03001 \text{ m/s} \cdot \text{fi kg/m}^3 \cdot \beta 600 \text{ s}} \right| \frac{23 \cdot \text{fi} 0^5 \text{ Bq/kg} 5}{}$$

b) Ennusta aktiivisuuspitoisuus 2 viikon kuluttua laskeumamittauksesta. Räjähdyksen ja laskeumamittauksen välinen aika oli 1 viikko.

$$\frac{t/20}{t/10} \left| \frac{\text{R} 3 \text{ viikkoa}}{\text{TM} 1 \text{ viikko}} \right|^{4132}$$

$$\heartsuit \quad t/20 \left| 23 \cdot \text{fi} 0^5 \text{ Bq/kg} \cdot \beta^{4132} \right| 23 \cdot \text{fi} 0^5 \cdot \beta^{4132} \left| \frac{73 \cdot \text{fi} 0^4 \text{ Bq/kg}}{} \right|$$

6.2 Myllyn mahdolliset toimenpiteet tuotteiden suojaamiseksi

Seuraavassa käydään läpi mahdollisia säteilytilanteen aikaisia toimenpiteitä jauhomyllyjen kannalta.

Tuotannon keskeyttäminen

Tuotannon keskeyttäminen olisi pystyttävä tekemään ennen kuin päästöpilvi ehtii tehdaspaikkakunnalle. Pilven saapuminen 100 km päässä olevalta onnettomuuspaikalta kestää 3–28 tuntia, jos tuulen nopeus on 1–10 m/s. On huomattava, että läheltä maan pintaa mitattu tuulen nopeus antaa liian optimistisen kuvan käytettävissä olevasta ajasta, koska tuulen nopeus on korkealla suurempi (Taulukko IV).

Uhkaavasta onnettomuustilanteesta kotimaassa, Ruotsissa tai Venäjän lähialueilla saadaan tieto jo tunteja ennen kuin radioaktiivisten aineiden päästöä tapahtuu. Esimerkiksi Sosnovyi Borin ja Kuolan voimaloista on suorat satelliittien kautta toimivat tietoliikenneyhteydet, joiden kautta voimalaitoksen valvomon työntekijät voivat lähettää STUK:iin automaattisen ensiviestin uhkaavasta onnettomuudesta. Annosnopeutta kotimaisten ydinvoimalaitosten ympäristössä mitataan jatkuvasti ja mahdollinen päästö havaitaan heti tuoreelltaan. Ruotsista tai Ruotsin ilmatilan kautta saapuvasta päästöpilvestä saadaan tieto Ruotsin viranomaisilta. Muualta kuin Suomesta tai Suomen lähiympäristöstä peräisin oleva päästöpilvi on laimentunut levitessään suureen ilmassaan, eikä aiheuta niin vakavaa uhkaa kuin läheltä tapahtunut päästö.

Tuotannon käynnistäminen uudelleen

Saastunut ulkoilma puhdistuu siinä vaiheessa, kun tuuli on kuljettanut viimeisetkin onnettomuuslaitokselta vapautuneet aineet tehdaspaikkakunnan ohi. Tämän jälkeenkin ilmassa voi olla aineita, jotka ovat aiemmin laskeutuneet maahan ja myöhemmin nousevat tuulen mukana ilmaan (resuspensio). Resuspensiosta aiheutuva aktiivisuuspitoisuus on kuitenkin vähäinen verrattuna varsinaisen päästöpilven aktiivisuuteen ja on vain poikkeustapauksissa ongelma ilmaa käyttävälle teollisuudelle. Tieto ilman puhtaudesta voi perustua STUKin tietoihin. STUK kerää onnettomuuden jälkeen ulkoilman aktiivisuuspitoisuudesta mittaustietoja eri paikkakunnilta sekä meteorologisia tietoja, joiden perusteella STUKilla on käsitys pintailman aktiivisuuspitoisuudesta maan eri osissa.

Ulkoilman puhdistuttua jää tuotannon uudelleenkäynnistämistä rajoittavaksi tekijäksi mahdollinen raaka-aineen aktiivisuus. Raaka-aineen aktiivisuuspitoisuus onkin syytä mitata, jos ulkoilmalla on ollut vapaa pääsy varastoihin.

Ennen tuotannon käynnistämistä on todennäköisesti järkevää puhdistaa tuotantotilat sekä tuotteiden puhtauden että henkilökunnan turvallisuuden varmistamiseksi.

Eniten saastuneen fraktion poisto prosessista

Jauhomyllyn tapauksessa poistoilman suodattimelta prosessiin palautettu jauho on todennäköisesti saastuneempaa kuin muu jauho. Tuotteiden aktiivisuuspitoisuus pienenee, jos on mahdollista jättää ko. jauho palauttamatta. (Tässä ei oteta kantaa toimenpiteen vaikutukseen tuotteen ominaisuuksiin). Näin saatu hyöty ei välttämättä ole kovin suuri. Lisäksi voimakkaasti saastuneen suodatimen käsittely on työturvallisuusongelma. Luotettavampi ja varmempi ratkaisu on pysäyttää tuotantoprosessi kokonaan, jos tehdas sijaitsee päästöpilven mahdollisella kulkureitillä.

Jauhojen radioaktiivisuuden mittaaminen

Saastuneelle ilmalle altistuneiden tuotteiden aktiivisuus on syytä mitata. Noin 50:llä kuntien elintarvikelaboratoriolla eri puolilla Suomea on STUKin toimittamat laitteet, jotka soveltuvat hyvin myös jauhojen ja jyvien mittaamiseen. On otettava huomioon, että samaan aikaan valmistettujen eri tuotteiden aktiivisuuspitoisuudet voivat poiketa toisistaan. Luvun 5 perusteella ei kuitenkaan ole odotettavissa kertaluokkien suuruisia eroja hienojen ja karkeiden jauhojen aktiivisuuspitoisuudessa.

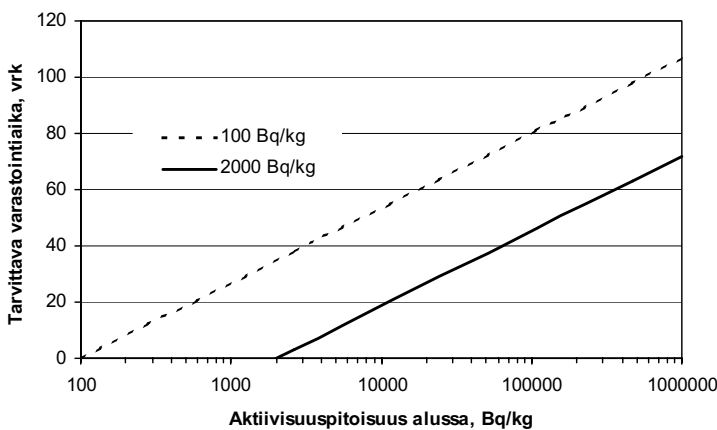
Varastointi jakelun viivästämiseksi

Jauhojen ym. pilaantumattomien elintarvikkeiden varastoiminen on tehokas keino poistaa nopeasti hajoavat radioaktiiviset aineet tuotteesta. Tietystä radioaktiivisesta isotoopista saastuneen tuotteen varastointiaika t saadaan seuraavasti,

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\alpha_0}{\alpha} \right) \quad (37)$$

missä α_0 on aktiivisuuspitoisuus varastoinnin alussa (Bq/kg) ja α varastoinnin jälkeen. $T_{1/2}$ on kyseisen nuklidin puoliintumisaika. Jauhojen varastointi sopii hyvin jodia vastaan, koska pitkäikäisimmän merkittävässä määrin vapautuvan jodi-isotoopin (^{131}I) puoliintumisaika on vain 8.02 vrk. Kuvasta 6 näkyy kuinka pitkään tuotetta pitää varastoida, jotta ^{131}I :n aktiivisuus alittaa raja-arvon 2000 Bq/kg. Varastointiaika on 35 vrk pitempi, jos tavoitteena on 100 Bq/kg. Esimerkiksi jauhojen ^{131}I -aktiivisuuden väheneminen lähtöarvosta 10^6 Bq/m³ tasolle 2000 Bq/m³ kestää 72 päivää, ja tasolle 100 Bq/m³ aikaa kuluu 107 päivää. Alkuperäistä ^{131}I -pitoisuutta ei varmaankaan tiedetä, joten jauhojen aktiivisuuden mittaaminen on tarpeen riittävää varastointiaikaa määrittäessä.

Cesiumista saastuneille tuotteille varastointi ei auta pitkän puoliintumisajan vuoksi. Tarvittava varastointiaika olisi vähintään vuosia (^{134}Cs) tai kymmeniä vuosia (^{137}Cs).



Kuva 6. Tarvittava varastointiaika, jotta ^{131}I :n ($T_{1/2} = 8.02$ vrk) aktiivisuuspitoisuus putoaa tasolle 2000 Bq/kg tai 100 Bq/kg.

7 Johtopäätökset

Elintarviketeollisuudessa käytetään ilmaa mm. jauhojen ja muiden tuotteiden pneumaattiseen kuljettamiseen. Ulkoilmaan päässeet radioaktiivisia aineita sisältävät hiukkaset kulkeutuvat tuulen mukana, ja osa niistä voi pilven ylikulkeutumisen aikana päätyä teollisuuslaitoksen sisään ottamaan ilmaan. Radioaktiivisten hiukkasten kiinnittyminen tuotteeseen voi tapahtua esimerkiksi kun tuotetta kuljetetaan pneumaattisesti ilmassa joka on saastunutta, tai kun tuotehiukkaset kerätään talteen poistoilmasta. Vaikkei ilmaa käytettäisikään, sisäilmassa olevat radioaktiiviset hiukkaset voivat laskeutua suojaamattomien tuotteiden pinnalle.

Suomessa tai Suomen lähialueilla tapahtuva erittäin vakava ydinvoimalaitosonnettomuus voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa ilmaa käyttävän jauhomyllyn tuotteiden saastumisen paljon yli EU:n onnettomuuden varalta asettamien aktiivisuuspitoisuuksien toimenpidetasojen. Saastunutta ilmaa käytettäessä tuotteiden aktiivisuuspitoisuus riippuu hyvin voimakkaasti mm. siitä, kulkeutuuko päästöpilvi suoraan kohti laitosta vai vähän sivuun, sääolosuhteista sekä radioaktiivisten hiukkasten ja tuotehiukkasten koosta. Tuotteiden saastumisasteen arvioiminen edes kertaluokan tarkkuudella on vaikeaa, joten tuotteiden puhtauden varmistamiseksi tuotannon keskeyttäminen on luotettavin toimenpide vaara-alueella. Ilman kautta tapahtuvan saastumisen ehkäisyn erityispiirre on, että tuotannon keskeytys on tehtävä nopeasti, ennen kuin päästöpilvi saapuu paikkakunnalle. Toisaalta tuotanto voidaan ilman käytön puolesta käynnistää uudelleen jo siinä vaiheessa, kun on varmaa, että radioaktiivinen pilvi on poistunut paikkakunnalta. Radioaktiivisten aineiden resuspensio (aiemmin maahan laskeutuneiden aineiden nouseminen takaisin ilmaan) aiheuttaa monta kertaluokkaa pienempiä radioaktiivisten aineiden pitoisuuksia ilmassa kuin mitä päästöpilven ohikulkeutuessa esiintyy. Päästöpilven poistumisen jälkeen muiden saastumisreittien, erityisesti raaka-aineiden mahdollisen saastumisen edellyttämä mittaustarve voi olla tuotannon käynnistämistä hidastava tekijä.

Ydinvoimalaitosonnettomuudessa vapautuvista radionuklideista keskeisiä ovat pitkän puoliintumisaajan ^{134}Cs ja ^{137}Cs . Nuklidin ^{131}I aktiivisuus voi myös olla hyvin korkea, mutta lyhyen puoliintumisaikansa (8 vrk) takia se ehtii poistua tuotteista, joita varastoidaan useita kuukausia.

Ydinaseräjähdyksessä vapautuvien radioaktiivisten aineiden kokonaisaktiivisuus pienenee nopeasti räjähdysen jälkeen. On erittäin epätoennäköistä, että elintarviketeollisuuden käyttämän ilman kautta tapahtuu merkittävää tuotteiden saastumista sellaisella lähilaskeuman alueella, jossa

kohonnut annosnopeus ei ole antanut aihetta ihmisten suojautumistoimenpiteisiin. Sen sijaan lähilaskeuman alle jäävät suojaamattomat raaka-aineet tai tuotteet voivat saastua käyttökelvottomiksi. Alueilla, jonne pilvi saapuu useita vuorokausia räjähdysten jälkeen, ei tuotteiden aktiivisuuspitoisuus pienene yhtä nopeasti kuin ensimmäisten vuorokausien aikana, koska elintarvikkeisiin joutuu tällöin puoliintumisajaltaan pidempiä radionuklideja.

On tärkeää, että elintarviketeollisuus saa säteilytilanteen uhatessa nopeasti tilannekuvan jo siinä vaiheessa kun radioaktiivisen päästön syntymisestä ei ole varmuutta. Päästön tapahduttua ja sen leviämisvaiheen jälkeen on tärkeää tunnistaa sellaiset tuote-erät, joihin voidaan epäillä joutuneen radioaktiivisia aineita. Tuotteen saastumisriskiä ei pidä liioitella, vaan tarkistaa epäilty tuote-erät jälkeinpäin luotettavilla mittausmenetelmillä. Kun pilven ohikulun aikana tapahtunut tuotteiden mahdollinen saastuminen on tarkistettu, voidaan odottaa laskeuman vaikutuksia seuraavassa sadossa ja varautua niihin. Vanhan sadon käyttämiseen ei yleensä liity säteilyriskiä.

8 Kirjallisuusviitteet

Eisenbud, M. Environmental radioactivity. 2. painos. Academic Press, New York, 542 s., 1973.

Glasstone, S. ja Dolan, P. J. The Effects of Nuclear Weapons (3. painos): U.S. Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 653 s., 1977.

Hallden, N.A., Fisenne, I.M., Ong, L.D.Y. ja Harley, J.H. Radioactive Decay of Weapon Debris. Rep. HASL-117 USAEC, Washington D.C., 1961.

Hanna, S.R., Briggs, G.A. ja Hosker Jr., R.P. Handbook on atmospheric diffusion. U.S.Department of Energy, Technical Information Center, 1982.

Hinds, W.C. Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2. ed. Wiley-Interscience, New York. 483 s., 1999.

IAEA. Modelling of resuspension, seasonality and losses during food processing. First report of the VAMP Terrestrial Working Group. Wien: IAEA; IAEA-TECDOC 647, 1994.

Irwin, J.S. A theoretical variation of the wind profile law exponent as a function of surface roughness and stability. Atmos. Environ. 13: 191-194, 1979.

Nair, S. K., Miller C.W., Thiessen, K.M., Garger, E.K. ja Hoffman, F.O. Modeling the resuspension of radionuclides in Ukrainian regions impacted by Chernobyl fallout. Health Phys. 72:77-85, 1997.

Neuvoston asetus (Euratom) No 3954/87, annettu 22 päivänä joulukuuta 1987, elintarvikkeiden ja rehujen radioaktiivisen saastumisen sallituista enimmäistasoista ydinonnettomuuden tai muun säteilytilan jälkeen. Virallinen lehti nro L 371, 30/12/1987 S. 0011-0013.

OECD Nuclear Energy Agency. Chernobyl: Ten Years on Radiological and Health Impact. An assessment by the NEA Committee on Radiation Protection and Public Health. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1995.

Pöllänen, R. (ed.). Säteily ympäristössä. Säteily- ja ydinturvallisuus–kirjasarjan 2. osa. Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2003.

Rantavaara, A ja Haukka, S. Radioactivity of milk, meat, cereals and other agricultural products in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A58. Säteilyturvakeskus, Helsinki, 105 s., 1987.

Sehmel, G.A. Particle and gas dry deposition: a review. Atmospheric Environment, Vol. 14, s. 983–1011, 1980.

Seinfeld, J.H. ja Pandis, S.N. Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. New York: Wiley-Interscience Publication, 1998.

Sinkko, K., Aaltonen, H., Mustonen, R., Taipale, T.K. ja Juutilainen, J. Airborne radioactivity in Finland after the Chernobyl accident in 1986. STUK-A56. Säteilyturvakeskus, Helsinki, 42 s., 1987.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000.

VAL 1.1 Ohje. Säteilysuojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa. Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2001.

Usein käytetyt lyhenteet

A	aktiivisuus, Bq
C_A	aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraali, (Bq/m ³)·s
c_A	aktiivisuuspitoisuus ilmassa, Bq/m ³
d	hiukkasen halkaisija
D	diffuusiokerroin, m ² /s
\dot{D}	ulkoisen säteilyn annosnopeus, Sv/h
f	aineen pitoisuus sisäilmassa jaettuna sen pitoisuudella ulkoilmassa
K	koagulaatiokerroin, m ³ /s
k	Boltzmannin vakio, 1,38·10 ⁻²³ J/K
M	tuotehiukkasten massapitoisuus ilmassa, kg/m ³
m_i	kokoluokkaa i olevien hiukkasten osuus tuotteen kokonaismassasta
N	hiukkasten pitoisuus ilmassa, kpl/cm ³
Q	tuotehiukkasten massavirtaus, kg/s
r	resuspensiokerroin, 1/m
S	laskeuma pinta-alayksikköä kohti, Bq/m ²
T	lämpötila, K
$T_{1/2}$	puoliintumisaika
t	aika
t_{kulk}	päästöpilven ohikulkeutumiseen kuluva aika
$t_{50\%}$	aika, jonka kuluessa puolet aktiivisista hiukkasista koaguloituu tuotehiukkasten kanssa
V	ilman tilavuusvirtaus, m ³ /s
v_d	depositionopeus, m/s
X	tuotteen aktiivisuuspitoisuuden laskennassa käytettävä apusuure
\acute{a}	tuotteen aktiivisuuspitoisuus (aktiivisuus tuotekiloa kohti), Bq/kg
ζ	dynaaminen viskositeetti, 1,81·10 ⁻⁵ Pa·s ilmalle 20 °C lämpötilassa
\tilde{n}	kaasun tiheys
\tilde{n}_j	tuotehiukkasten tiheys

Alaindeksejä

0	referenssiajankohta; päästöpilven saapumisaikajankohta
a	aktiivinen hiukkanen
in	ilman mukana sisään tuleva
j	tuotehiukkanen (esim. myllyssä jauhahiukkanen)

Ilmatieteen laitoksen ja VTT:n SILAM-ohjelmalla laskema ^{131}I :n aktiivisuuspitoisuus 6–24 tuntia päästön alkamisen jälkeen kuvitteellisessa Kuolan ydinvoimalan onnettomuudessa. Vastaavia laskelmia on tehty myös kotimaisille ja muille lähialueen ydinvoimaloille.

